



EESTI MAAÜLIKOOL

Tehnikainstituut

**Heimar Linde**

**LEHTMATERJALIDE TERMILISE TÖÖTLEMISE**

**PROTSESSI JUHTSEADE**

**THERMAL PROCESSING CONTROLLER OF SHEET  
MATERIALS**

Magistritöö

Energiakasutuse õppekava

Juhendaja: dotsent Eugen Kokin, *DSc*

**Tartu 2018**

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Fr. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Heimar Linde		Õppekava: Energiakasutus	
Pealkiri: Lehtmaterjalide termilise töötlemise protsessi juhtseade			
Lehekülgi: 64	Jooniseid: 27	Tabeleid: 11	Lisasid: 3
<p>Osakond: Energiakasutuse õppetool</p> <p>ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika, 4.17. Energeetikaalased uuringud; T140 Energeetika</p> <p>Juhendaja(d): Eugen Kokin, DSc</p> <p>Kaitsmiskoht ja –aasta: Tartu, 2018</p>			
<p>Lehtmaterjalide termilise töötlemise korral on tähtis kuumutuseadme täpne reguleerimine protsessi kiireks ja efektiivseks läbiviimiseks. Seni kasutusel olnud lahendused mõõdavad temperatuuri kuumutusahjus, aga mitte töödeldava detaili pinnatemperatuuri.</p> <p>Protsessi juhtseadme ülesanne on mõõta temperatuuri kontaktivaba mõõtmise teel ning vastavalt saadud mõõtetulemustele juhtida küttekehade lülitusi selliselt, et saavutada võimalikult ühtlane temperatuur mitmes eri tsoonis.</p> <p>Uurimustöö põhieesmärk on projekteerida ja valmistada lehtmaterjalide töötlemise protsessi juhtseadme prototüüp vastava protsessi läbiviimiseks.</p>			
Märksõnad: Kontaktivaba mõõtmine, infrapuna, temperatuur, relee, kontrollid			

Estonian University of Life Sciences Fr. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Heimar Linde		Curriculum: Energy Application Engineering	
Title: Thermal Processing Controller of Sheet Materials			
Pages: 64	Figures: 27	Tables: 11	Appendixes: 3
<p>Department: Chair of Energy Application Engineering</p> <p>Field of research and (CERC'S) code: 4. Natural Sciences and Engineering</p> <p>4.17. Energetic Research</p> <p>T140 Energy research</p> <p>Supervisors: Eugen Kokin, DSc</p> <p>Place and date: Tartu, 2018</p>			
<p>In the process of controlling sheet materials heating process, precision is needed for rapid and effective control. Solutions used until now mostly measure the temperature inside the heater, but not from the surface of the material.</p> <p>The function of the process controller is to measure temperature by non-contact measurement and according to the measurement value, control heater circuit switching in a way to obtain a uniform temperature in several different heating zones.</p> <p>The main objective of the thesis is to develop and manufacture a sheet materials heating process controller prototype in order to carry out the corresponding process.</p>			
Keywords: Non-contact measurement, infrared, temperature, relay, controller			

# SISUKORD

LÜHENDID JA TÄHISED .....	5
SISSEJUHATUS .....	6
1. TEMPERATUURIMÕÕTMISE SEOSSED .....	8
1.1. Teoreetilised aspektid infrapuna temperatuurimõõtmisel .....	8
1.2. Kuumutusahju kirjeldus.....	8
1.3. Võimsuse reguleerimine .....	11
1.4. Kasutatavate lehtmaterjalide kiirguslikud omadused .....	13
1.5. Mõõtmise viga tulenevalt valest emissioonitegurist .....	14
2. SEADE .....	17
2.1. Kuumutusahju täiustamise vajadus .....	17
2.2. Toodetavad sarnased seadmed.....	18
2.3. Valminud kontrolleri ( <i>Raspberry Pi baasil</i> ).....	20
2.4. Valminud graafiline keskkond.....	22
2.5. Ekraani korpus .....	24
3. MATERJAL JA METOODIKA.....	27
3.1. Lehtmaterjali pinnatemperatuuri mõõtmise erinevad meetodid .....	27
3.2. Kasutatavad andurid .....	29
3.3. Andurite kaitsmine .....	35
3.4. Emissioonitegur .....	37
3.5. Pooljuhtreleed kontrolleri lülituste tarvis .....	39
3.7. Patendiuuring.....	42
3.8. Seadme juhtprogramm.....	46
3.9. Seadme maksumus .....	49
4. UURIMISTÖÖ TULEMUSED JA ARUTELU .....	51
KOKKUVÕTE .....	53
KIRJANDUS .....	54
SUMMARY .....	57
LISAD .....	58
LISA A Juhtprogramm .....	59
LISA A. järg: Juhtprogramm.....	60
LISA A. järg: Juhtprogramm.....	61
LISA B Kood anduri koodi vahetuseks .....	62
LISA C Kood anduri emissiooniteguri vahetuseks .....	63

## LÜHENDID JA TÄHISED

<i>ABS</i>	– abs plastik ( <i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i> )
<i>ASCII</i>	– Ameerika Informatsioonivahetuse Standardkood
<i>Bluetooth</i>	– traadita seadmete vaheline ühendus
<i>DC</i>	– alalisvool ( <i>Direct Current</i> )
<i>EEPROM</i>	– püsimälu, ( <i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i> )
<i>GPIO</i>	– üldotstarbelised sisend-väljundviigud
<i>I</i>	– voolutugevus, A
<i>I2C</i>	– jadasiin andmevahetusel, ( <i>Inter-Integrated Circuit</i> )
<i>i2cmaster</i>	– lisateek perifeeriaseadmetega suhtlemiseks
<i>IP-kood</i>	– elektriseadme kaitseastme numbriline näit ( <i>International Protection</i> )
<i>kB</i>	– kilobait, andmeside maht
<i>LCD</i>	– vedelkristallkuvar ( <i>Liquid Crystal Display</i> )
<i>Nextion</i>	– programmeeritav ekraanimoodul
<i>P</i>	– võimsus, W
<i>PID</i>	– proportsionaal-integraal-diferentsiaalregulaator
<i>PT-100</i>	– plaatina takistustermomeeter, R= 100 Ω (0 °C)
<i>PT-1000</i>	– plaatina takistustermomeeter, R= 1000 Ω (0 °C)
<i>q-</i>	– võimsus, mida ahi väljastab ühe ruutmeetri kohta
<i>SCR</i>	– juhitud ränialaldi ( <i>Silicon-Controlled Rectifier</i> )
<i>serial</i>	– jadaühendus pordi kaudu
<i>T'</i>	– reaalne objekti temperatuur Kelvinites
<i>T</i>	– reaalne objekti temperatuur Kelvinites, erineva emissiooniteguri korral (0,95...1,0)
<i>TFT</i>	– vedelkristallkuvari põhitüüp ( <i>Thin film transistor liquid crystal display</i> )
$\rho$	– tihedus, kg/m <sup>3</sup>
<i>U</i>	– pinge, V
<i>UART</i>	– jadaliides ( <i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> )
<i>US</i>	– Ameerika Ühendriigid ( <i>United States of America</i> )
<i>VNC</i>	– Virtuaalse võrgu kaudu arvutiga suhtlemine ( <i>Virtual Network Computing</i> )
<i>W<sub>andur</sub></i>	– Anduri poolt mõõdetud kiirguslik energia tehaseseades
<i>W<sub>obj</sub></i>	– Anduri mõõdetud reaalse kiirguslik energia hulk õige emissiooniteguri korral
$\varepsilon$	– emissioonitegur
$\sigma$	– Stefan-Boltzmanni konstant

## SISSEJUHATUS

Lõputöö eesmärgiks oli idee koostada temperatuuri kontrolleri, mis võimaldaks kontaktivaba mõõtmise tulemuste põhjal kontrollida lehtmaterjali pinnatemperatuuri ning vastavalt sellele juhtida kütteseadet. Kuna varasem kokkupuude oli *Raspberry Pi* tüüpi mikroarvutiga, siis otsustati seda kasutada ka kontrolleri koostamiseks.

Selle koostamiseks oli põhjuseid mitmeid:

- 1- Selline mõõtmisviis on mõistlik kuumade, liikuvate pindade või raskesti ligipääsetavate tsoonide mõõtmise tarvis, või juhul kui füüsiline kontakt mõõtmisel võib kahjustada mõõdetavat materjali.
- 2- Infrapuna temperatuurianduri ajakonstant on kordades väiksem kui enamus turul leiduvate termopaaride, *PT-100* või *PT-1000* tüüpi andurite korral.
- 3- Mikroarvuti baasil loodud kontrollereid on suhteliselt lihtne programmeerida ja seadistada vastavalt protsessi olemusele.
- 4- Kasutatav seade oleks maksumusega alla 600 € ja komponendid lihtsasti asendatavad rikete korral.
- 5- Võimalus kogutud andmete salvestamiseks ja hilisemaks analüüsiks, mida lihtsakoelisel temperatuuri kontrolleri enamasti pole. Lisaks mitmetsoonilise temperatuuri kontrolli võimalus.
- 6- On tarvis luua madalama soetamismaksumusega seadme prototüüp vaakumvormimisseadme täiustamiseks, mis võimaldaks kontrollida kütteahju lehtmaterjali pinnatemperatuuri järgi.

Selleks, et valmistada protsessi juhtseade *Raspberry Pi* baasil, uuritakse missuguseid sisendsuursusi on tarvis mõõta ja millistele nõuetele peab protsessi juhtseade vastama. Samuti vaadeldakse komponente, millest on otstarbekas seadet koostada.

Komponentide olemasolul koostatakse hilisemalt kontrolleri prototüüp ja ümbritsev korpus. Et seadmega mõõtmisi teostada, koostatakse juhtprogramm. Seadme valmimisel juhitakse

sellega lehtmaterjalide pinnatemperatuuri. Seadme toimivuse hindamiseks võrreldakse mõõdetud tulemuste varieeruvust lehtmaterjali pinnal neljas eri punktis, samuti temperatuuriandurite soojenemist.

Juhul, kui seade end õigustab, võimaldab see kontrollida tööstuslikke protsesse. Samuti on taolisest lahendusest tõenäoliselt huvitatud ka tööstusettevõtted, kes tegelevad lehtmaterjalide töötlemisega.

Eelnevalt mainitu põhjal selgub, miks käesolev teema on aktuaalne ning miks käesolev teema on üldsusele huvipakkuv.

# 1. TEMPERATUURIMÕÕTMISE SEOS

## 1.1. Teoreetilised aspektid infrapuna temperatuurimõõtmisel

Püromeetria (*pyrometry*) tuleneb kreeka sõnast „*pyr*“, mis tähendab tuld (lõket), seega on see mõiste sobilikum kõrgete temperatuuride mõõtmiseks ja madalamate temperatuuride mõõtmiseks on sobilikum infrapuna termomeetria või kiirguse termomeetria. [1]

Inimsilmale on nähtav kindlas spektriulatuses olev elektromagnetiline kiirgus. Väga kuumade objektide korral on see lainepikkusega 0,4 kuni 0,7, vastavalt sinise või punase värvusega. [1]

Kuna temperatuur on aatomite keskmise kineetilise energia mõõt, siis võib loogiliselt eeldada, et saame mõõta objekti temperatuuri mõõtes väljastatavat elektromagnetilist kiirgust. See eeldus on aluseks infrapuna temperatuuri mõõtmisele. [1]

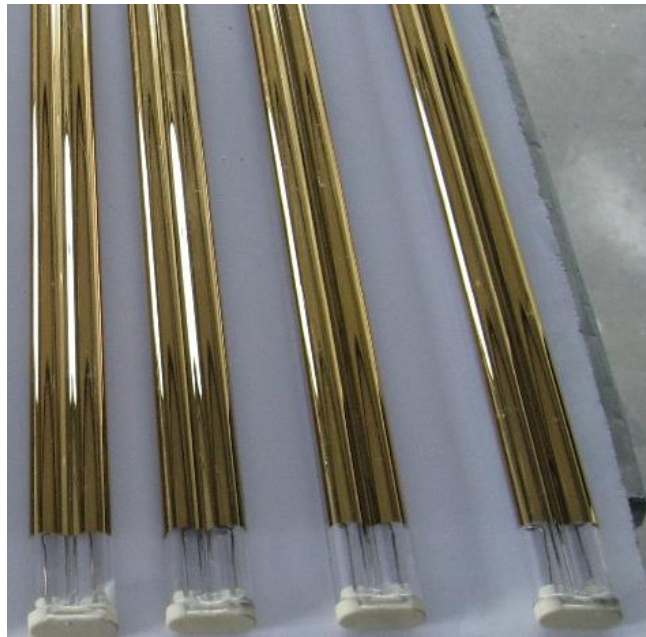
Kuumad objektid ei ole sedasi alati inimsilmaga eristatavad, samuti mõjutab ruumi valgustatus seda, kas ja kuidas seda näeme. Käesolevas töös valmiva seadme korral on tegu olukorraga, kus materjali temperatuuri erinevust lehtmaterjali väliste nähtuste põhjal on raske eristada. See omakorda loob vajaduse täpseks temperatuuri mõõtmiseks. Ohutustehnilises mõttes on samuti vajalik olla ettevaatlik materjalide käitlemisel.

## 1.2. Kuumutusahju kirjeldus

Kasutatav kuumutusahi kuumutab infrapuna soojuskiirguse abil lehtmaterjali. Eelnevalt valmistatud kuumutusahju kütteelementideks on kvartsklaasiga ümbritsetud nikkelkroom takistustraadi spiraalid ehk teisisõnu infrapuna kütteelemendid.

Tulenevalt küttekehade valikust, sõltub see, millise kauguse korral lehtmaterjalist kuumutusahi efektiivne on. Järgnevalt on kirjeldatud ja näidatud joonisel 1.1 kasutatavad kütteelemendid:





**Joonis 1.1.** Kütteelemendid [2]

Tegemist on avatud tüüpi küttekehadega, juhtmetega ühendatud ühelt poolt, pealtpoolt kaetud kuldse reflektoriga. Viimane tõstab efektiivsust infrapuna soojusenergia suunamisel soovitud suunas.

Valitud küttekehad on sobilikud mitme tsooni kontrollimiseks, võimaldades kiirelt ümbritsevaid objekte kuumutada. Tegemist on keskmise lainepikkusega infrapuna kiirgusega. [2]

Kuigi kiirguslikku mõju on silmaga raske eristada, on tähtis kaitsta silmi peegelduva kiirguse eest ümbritsevasse keskkonda, mis juba 10 minutilise töötükli korral tunda annab. Tabelis 1.1. on väljendatud muud kütteseadme parameetrid:

**Tabel 1.1.** Kütteseadet iseloomustavad parameetrid [2]

Parameeter, ühik	Väärtus
Koguvõimsus kütteahjul, kW	10
Küttekeha mõõtmed, mm	900×33×15
Toitepinge, V	2×230
Eeldatav eluiga, h	5000
Maksimaalne küttekeha temperatuur, °C	1100
Maksimaalne lehtmaterjali pinnatemperatuur, °C	500 – 900
Efektiivne kiirguskaugus, mm	300 – 1500

Kütteseadme ühe küttekeha võimsus on 2500W, neid on paigaldatud kokku neli. Kütteseadme võimsus on piiratud kasutuskoha peakaitsme suuruse tõttu ( $3 \times 32\text{A}$ ), kuna tegu on aktiivkoormusega, siis oomi seadusest lähtuvalt tuleneb :

$$P = U \cdot I \rightarrow I = \frac{P}{U} \rightarrow I = \frac{10000}{230} = 43,5 \text{ A} \quad (1.1)$$

kus  $P$  on küttekehade võimsus W;

$U$  – faasipinge V;

$I$  – voolutugevus A.

Arvutuslikul teel saadud kogu voolutugevus on 43,5 A, arvestatuna ühe faasi kohta. Jaotades koormuse mitme faasi peale, väheneb voolutugevus faasi kohta vastavalt. Jaotuskilbi kaitsmed on  $3 \times 25\text{A}$ , jagades eelnevalt arvutatud koormuse kahe faasi peale, saame faasi koormuseks 21,75 A.

Arvutatu põhjal lähtub, et oluliselt rohkemate tarbijate lülitamine vastavasse ahelasse, ilma kaitset suurendamata ei ole seadme töökindlust arvestades võimalik.

Kolmas faas on kasutusel ühefaasiliste pistikupesade ja valgustuse tarvis, ventilaatorite ja vaakumpumba ning kontrolleri toiteks, mistõttu seda ei kasutata küttekehade toiteks. Ka tuleb arvestada kolmefaasilise elektrimootoriga kompressori tööga, mille töötsükli voolutarve on 6A faasi kohta, seega pole mõeldav kõigi tarbijate üheaegne lülitus.

Kuigi antud infrapuna küttekehadel on eeliseid nagu kiire kuumenemis- ja jahtumisaeg, siis soojuskiirguse levik ei peatu vahetult küttekehade väljalülitamisega. [2] Selleks, et peatada koheselt soojuskiirguse levik, tuleks kasutada vastavaid klappe ja lisaseadmeid infrapuna kiirgusallika ees. Mida võimsamaid küttekehasid kasutada, seda jämedama läbimõõduga on reeglina kasutatav kütetraat ja seega ka suurem küttekeha mass, mis jahtudes veel täiendavalt soojust eraldab.

Üks viis seda reguleerida on blokeerida otseselt kiirguse allikas, peatades sellega edasise soojuskiirguse. Seni on tulnud kiirelt eemaldada kütteahi kuumutatava lehtmaterjali kohalt, et peatada edasine materjali kuumutamine. Protsessi teeb keeruliseks ka materjali läbipaindumise hindamine õigeaegseks süsteemi reguleerimiseks.

### 1.3. Võimsuse reguleerimine

Küttekehade võimsuse reguleerimiseks kasutatakse täiendavaid lisaseadmeid. Tegemist on SCR (*Silicone Controlled Rectifiers*) – juhitava räni alaldiga. [3]

Selle abil on võimalik reguleerida toitepinget vahemikus 0–100%. Antud seos on mittelineaarne ning reguleerimiseks on sada võimalikku väärtust. Oma olemuselt on tegu faasmodulatsiooniga, mille abil reguleeritakse võimsust. [5]

Tegu on eraldiseisva seadmega, mis on vajalik proportsionaalselt sisestatava energiahulga vähendamiseks. Kuna erinevate termoplastide kuumutamine on teinekord keeruline, siis sedasi on võimalik pikendada kuumutusaega, kasvõi vajadusel niiskuse eemaldamiseks termoplastist lehtmaterjali korral pikema aja jooksul materjali soojendades.

Samuti aitab see vähendada ka ohtu materjali ülekuumutamiseks küttekehade massi põhjustatud ajakonstandi tõttu ja sealt kiirguva soojusenergiaga vahetult peale kütmise lõpetamist. Eriti oluline on see õhemate lehtmaterjalide kuumutamise ajal. See tähendab õhemate kui 1 mm paksuste materjalide korral. Võimsuse regulaator on näidatud joonisel 1.2:



**Joonis 1.2.** Võimsuse regulaator [5]

Antud võimsuse regulaatoreid on kokku neli. Reguleerimise toimimiseks on tähtis vahetu ühendamine küttekehaga selliselt, et iga küttekeha on ühendatud eraldi neutraaljuhtmega.

Mis tahes väljundi vahepealse sildamise korral regulaator tööle ei hakka ja vastasel juhul reguleerimine pole võimalik nagu selgub katsetuste tulemusel.

Protsessi käigus soojuste hajutamiseks on tähtis suuremate võimsuste korral piisava jahutuse tagamine antud komponendi pikema eluea huvides. Kestvuse huvides, võiks temperatuur mitte ületada 80 °C piiri, maksimaalselt 125 °C piiri. [4]

Kuigi tootja poolt lubatud maksimaalne voolutugevus türistorile on 80A, siis ei saa seda tõepähe võtta kuna välja pole toodud aega, mille jooksul tagatakse tõrgeteta töö seadmele sellise voolutugevuse korral. [4] Sellisel juhul on kindlasti vajalik soojusliku energia hajutamine.

Aktiivkoormuse korral on võimalik kuni 10 kW tarbija ühendamise lühiajaliselt [4] Reaalselt ühendatakse antud regulaatorile järgi 2,5 kW küttekeha, mistõttu liigset kuumenemist pole karta, kuna kasutatakse kõigest veerandik komponendi võimsusest.

Kaitsmaks komponente ja elektriohutuse tagamiseks on võimsuse regulaatorid paigaldatud eraldi karbikusse ja ühendatud tööpingi külge statsionaarselt. Selleks otstarbeks kohandati spetsiaalne ventilaatoritega varustatud karbik, mis teeb seadme käsitlemise mugavamaks. Komponentide kinnituseks kohandati alumiiniumplaat eesmärgiga suurendada soojust hajutavat pinda.

Ventilaatorite toiteks paigaldati 12 V AC trafo, mida on täiendatud dioodsillaga pinge muundamiseks 12 V alalispingeks, vältimaks lisakulutuste teket sobiva toitemooduli soetamiseks. Tabelis 1.2 on välja toodud võimsuse regulaatori parameetrid:

**Tabel 1.2.** Võimsuse regulaatori parameetrid [5]

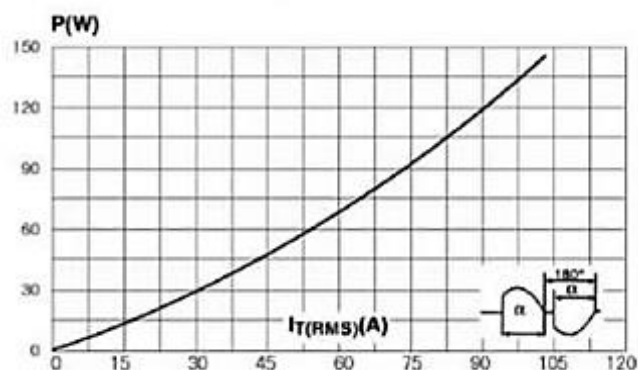
Parameeter, ühik	Väärtus
Tööpinge, V (AC)	230
Maksimaalne võimsus, kW	10
Maksimaalne türistori voolutugevus, A	80
Reguleeritav vahemik, %	0 – 100

Eelised taoliste pooljuht seadmete kasutamisel mehaaniliste seadmete ees on: [3]

1) Vähenenud hooldus ja käitlemiskulud, pole mehaaniliselt kuluvaid osi.

- 2) Elektriliselt vaiksem, lülitub sisse ja välja ajaperioodil, mis ei too kaasa raadiohäireid.
- 3) Ei põhjusta liini toitepinge moonutusi sarnaselt elektromagnetilisele käivitile.
- 4) Parem kontroll ja lühemad tsükliajad, mis võimaldavad paranenud protsessi juhtimist.

Järgnevalt on joonisel 1.3 välja toodud kasutatava regulaatori soojuseraldus vastavalt voolutugevusele:



**Joonis 1.3.** Maksimaalse võimsuse korral soojuseraldus [4]

Nagu jooniselt lähtub, siis 80 amprise voolutugevuse korral on seadme soojuseraldus suurusjärgus 100 W, mis on üpris arvestatav küttevõimsus, võrreldatav näiteks võimsama jootekolviga. Järeldusena võib öelda, et sellise voolutugevuse korral ülekuumenemine ilma väga korraliku jahutusega on paratamatu.

Kuna antud lõputöös kasutatavad voolutugevused ühe seadme kohta jäävad suurusjärku 10–11 A tulenevalt küttekeha võimsusest, siis sellisel juhul on soojuseraldus ligikaudu 13 W, mida võib võrrelda juba tunduvalt tagasihoidlikuma soojusallikaga. Seda kõike siis maksimaalvõimsuse korral.

## 1.4. Kasutatavate lehtmaterjalide kiirguslikud omadused

Infrapuna temperatuurimõõtmise korral on vajalik teada täpsemaks temperatuuri mõõtmise läbiviimiseks vastava lehtmaterjali emissioonitegurit, need on välja toodud järgnevalt tabelis 1.3:

**Tabel 1.3.** Materjalide emissioonitegurid [6]

Materjal	Emissioonitegur, $\epsilon$
Kips	0,86...90
Kips: kare	0,91
Plastik: akrüül, läbipaistev	0,94
Plastik: must	0,95
Plastik: valge	0,84
Plastik pakend: punane	0,94
Plastik pakend: valge	0,84
Pleksiklaas: <i>Perpex</i>	0,86
Polüpropüleen	0,97
Polüvinüülkloriid ( <i>PVC</i> ).	0,91...0,93
Klaas	0,92
Klaas: keemiatööriistad (osaliselt läbipaistev)	0,97
Klaas: külmunud	0,96...0,70
Klaas: poleeritud	0,94

Kasutatavate andurite korral on tehasepoolne emissiooniteguri vaikeväärtus 1, see omakorda on tuletatud ideaalse mustkehaga kalibreerimisel, mille emissioonitegur on suurusjärgus 0,99(9) ehk ümardatult 1.

Esmane meetod anduri emissiooniteguri muutmiseks on *Arduino Uno R3* kasutamine vastava juhtprogrammiga. Sel meetodil on võimalik seadistada andureid kasutamiseks teise materjaliga. Anduri ühendamine eeldab sarnaste ühenduste loomist nagu on kirjeldatud järgnevalt mikroarvuti *Raspberry Pi* korral.

### 1.5. Mõõtmise viga tulenevalt volest emissioonitegurist.

Tehasepoolne vaikeväärtus emissiooniteguril on 1,0, musta plastiku korral reaalselt jääb see 0,95 juurde. Arvutame temperatuuri mõõtmise viga tulenevalt emissiooniteguri erinevusest. Kiirgunud energia leiame järgneva valemi 1.2 abil: [7]

$$W_{andur} = \epsilon_{1,0} \cdot \sigma \cdot T_{1,0}^4 \quad (1.2)$$

kus  $W_{andur}$  on kiirgunud energia hulk mõõdetuna anduri poolt;  
 $T_{1,0}^4$  – tehaseseades anduri mõõdetud temperatuur K;  
 $\epsilon_{1,0}$  – emissioonitegur, anduri tehaseväärtusena;  
 $\sigma$  – Stefan–Boltzmanni konstant.

Reaalne mõõdetava objekti emissioonitegur on 0,95, ja seega ka mõõdetud temperatuuri väärtus sarnase emissiooniteguri korral, väljendatud järgmiselt: [7]

$$W_{obj} = \varepsilon_{0,95} \cdot \sigma \cdot T_{0,95}^4 \quad (1.3)$$

kus  $W_{obj}$  on kiirgunud energia hulk mõõdetuna lehtmaterjalilt;  
 $T_{0,95}^4$  – ümberseadistatud anduri mõõdetud temperatuur K;  
 $\varepsilon_{0,95}$  – emissioonitegur musta plasti korral;  
 $\sigma$  – Stefan–Boltzmanni konstant.

Asetades valemid 1.2 ja 1.3 omavahel võrrandisse, saame: [7]

$$\varepsilon_{1,0} \cdot \sigma \cdot T_{1,0}^4 = \varepsilon_{0,95} \cdot \sigma \cdot T_{0,95}^4$$

Mõõdetud temperatuur  $T_{1,0} = 300\text{ °C} = 573\text{ K}$ , kui reaalne mõõdetava objekti emissioonitegur on 0,95.  $T'$  tähistab tundmatut väärtust võrrandis, mille peab täiendavalt leidma, ehk temperatuur *Kelvinites* õige emissiooniteguri korral. Kuna *Stefan–Boltzmanni* konstant taandub välja siis jääb meil järele järgnev.

$$(1,0) \cdot (573)^4 = (0,95) \cdot (T')^4$$

Avaldame siit võrrandist tegeliku temperatuuri väärtuse  $T'$  järgnevalt:

$$T' = (573) \cdot \left(\frac{1,0}{0,95}\right)^{\frac{1}{4}} = 580,395\text{ K}$$

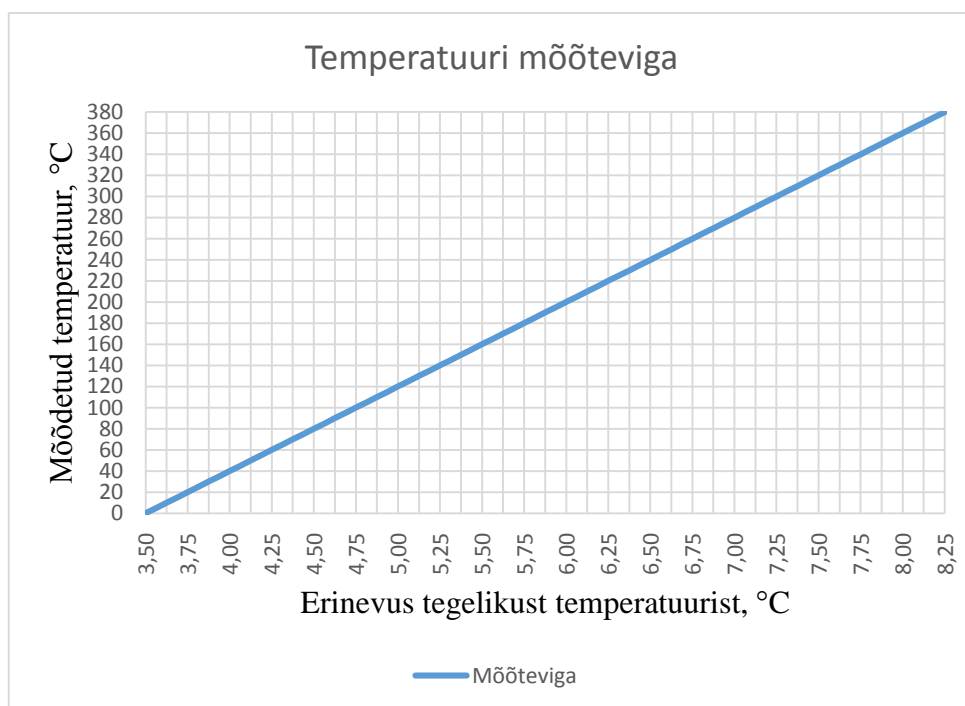
Tegelik temperatuuri väärtus on 580,395 K. See võrdub temperatuuriga 307,25 °C. Sisestame ka eelnevalt arvutustes kasutatud temperatuuri väärtuse 300 °C. Leiame viimaks  $\Delta T$ , ehk temperatuuride vahe:

$$\Delta T = 307,395 - 300 = 7,395\text{ °C}$$

Arvutuste tulemusel selgus, et temperatuuri mõõteviga tulenevalt valemist emissioonitegurist on 300 °C juures 7,395 °C. Vastavad väärtused on 200 °C juures vastavalt 6,08 °C ning

100 °C juures 4,72 °C. Arvutustest selgub, et mida suurem on temperatuur, seda suurem on mõõteviga. Lisaks liitub siia valitud anduri eripärast tulenev mõõtetäpsus, mis vastavat mõõtevea väärtust veel suurendab.

Kõrgeima mõõdetava temperatuuri 380 °C juures on mõõteviga 8,42 °C. Anduri enda mõõtetäpsus on sellise temperatuuri korral  $\pm 4$  °C. Liites vastavad mõõtevead emissioonitegurist tulenevalt ja anduri enda eripärast tekib olukord, kus mõõtetäpsus on lubamatult suur. Muud mõõtevea väärtused on kujutatud joonisel 1.4:



**Joonis 1.4.** Mõõteviga erineva emissiooniteguri korral

Mõõteviga, mis tekib vales emissioonitegurist, musta plastilehe näitel seadistamata andurite väärtuse korral on indikaator sellest, et antud seos on lineaarset laadi. See omakorda tähendab, et vastava valemi abil temperatuuri väärtust ringi arvutades on võimalik muuta väljastatavat temperatuuriväärtust soovitud suunas.

Selleks otstarbeks on lisatud juhtprogrammi, mis asub lisas A, täiendav koodilõik, mis võimaldab lisada polünoomi väärtuse anduri poolt väljastatud temperatuurile ja mis kuvatakse eraldi tulbas *Exceli* tabelis. Lisaks temperatuuri väärtustele anduri kohta ja anduri



corpuse temperatuuri väärtusele on kuvatud ka korrigeeritud temperatuuri väärtus, mille korral on võimalik arvestada kalibreerimisel kasutatud polünoomi väärtust.

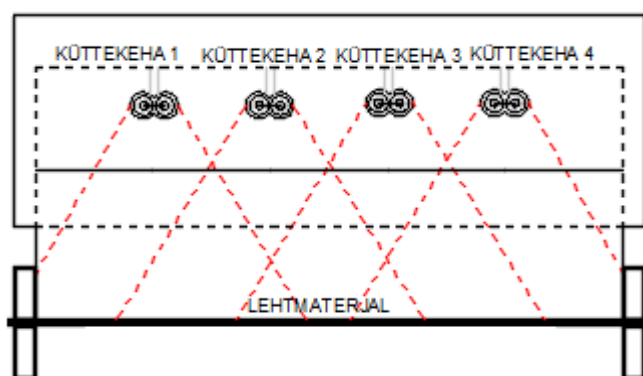
## 2. SEADE

### 2.1. Kuumutusahju täiustamise vajadus

Infrapuna soojuskiirgusliku toime juhtimine on keeruline protsess. Selleks, et ühtlustada temperatuur materjali ulatuses, on vajalik õhku lehtmaterjali kohal pidevalt segada ja kuumutusahi peab olema hästi isoleeritud vältimaks pidevat külma õhu juurdevoolu. See võimaldab kiirema aja jooksul ühtlasemalt materjal kuumutada soovitud temperatuurile.

Kui tööstuslike konvektsioonahjude korral kasutatakse selleks kinniseid kütteelementidega kambreid, kust siis vastavalt turbo või kuumaõhu ventilaatoritega, suunatakse õhk soovitud kohta. Infrapuna kütteelementide korral puudub sel suurem kasutegur, kuna kiirguse toimel kuumutatakse ümbritsevaid materjale rohkem kui sealt olevat õhku. Õhk soojeneb materjalide kuumenemise arvelt konvektsiooni teel.

Vajadus õhu segamise järele on puhtalt vajalik materjali temperatuuri ühtlustamiseks materjali pinnalt. Praegune olukord on sarnaselt joonisele 2.1:



**Joonis 2.1.** Infrapuna kiirguse levik lehtmaterjalile

Infrapuna kütteekehade pealispind on kuldse reflektorkattega, mis vähendab kiirguse mõju suundades, kus seda tarvis pole. Kuigi peamiselt kasutatav lehtmaterjal on musta värvi ja

seetõttu on ülekaalus neelduv kiirgusfoon, siis juhul kui kasutada materjali, mille peegeldusomadused on suuremad kui neelduvad omadused, siis tuleb arvestada ka kütteahju tagasipeegeldunud kuumuse mõjuga ja ahju konstruktsioon peab selle välja kannatama ilma probleemideta.

## 2.2. Toodetavad sarnased seadmed

Enne uue seadme prototüübi valmistamist on tähtis teada, milliseid seadmeid juba toodetakse, mida need võimaldavad ning palju see ligikaudu maksma läheb. Järgnevalt on välja toodud mõned neist:

1) Omega engineering poolt pakutav *OMEGA CN1504B* protsessi kontrolleri: [8]



**Joonis 2.2.** Protsessi kontrolleri [8]

Protsessi kontrolleri hind on 525 €, koos sensoritega *OS35-20-MA-500C-24V*. Andurid väljastavad 4–20 mA väljundsignaali. Võimaldavad mõõta vahemikus 0–500 °C ja on varustatud optikaga suurendusvõimega 20:1. [9]

Kuna infrapuna temperatuuriandurite hind on ainult 950 € anduri kohta, siis nelja tsoonilise kontrolleri tellimine koos anduritega tuleks suurusjärgus 4325 €. Mis ületab lähteülesandes sätestatud hinnapiiri. [8] Lisaks ei võimalda kontrolleri muuta lihtsal kujul emissioonitegurit, kontrolleri käsitus on keerulisem puuduliku graafilise kasutajaliidese tõttu.

Järgnevalt on välja toodud järgmine konkurentide poolt toodetav artikkel:

2) *Calexi* poolt pakutav *Pyrominibus* infrapuna temperatuurikontrolleri. Pakutav kuue infrapuna temperatuurianduriga kontrolleri, mis võimaldab kuue kanaliga temperatuuri kontrolli, koos alarmide ja andmete logimisega, relee väljundite ja valikuliste moodulite

lisamise võimalusega. Andurid võimaldavad mõõta temperatuuri  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuni  $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [10] Optikalt pakutavaga on ligilähedaseim 20:1 suhtega. Pakutav kontrollerr on välja toodud joonisel 2.3:



**Joonis 2.3.** Protsessi kontrollerr [10]

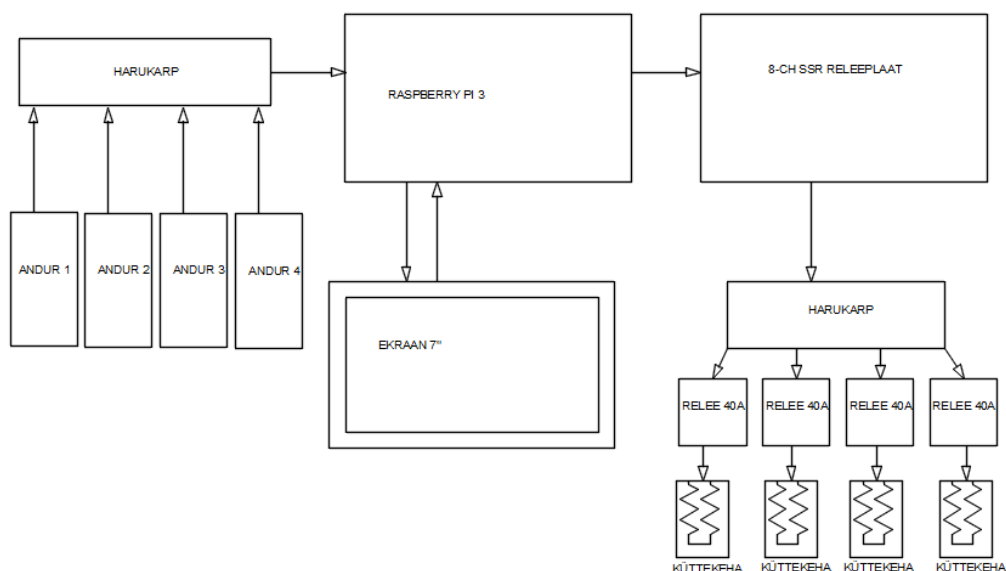
Antud süsteem võimaldaks juhtida protsessi, kuid hind on suurusjärgus  $\sim 2800\text{ €}$ . Mis ületab antud juhul lähteülesandes sätestatud  $600\text{ €}$  piiri. Antud tootja pakub ka teist, mõnevõrra lihtsamat kontrollerreri tüüpi, kuid, mis ei võimalda mitme temperatuuritsooni kontrollimist. Seade on tootja põhine ja lisaks on võimalik erinevaid mooduleid juurde tellida. Selleks, et juhtida võimalik oleks pakutava protsessikontrollerreri abil seadmeid, on tarvis sellele releeväljundiga moodul lisaks tellida.

3) Valminud *Raspberry Pi* baasil protsessi kontrollerreri prototüüp koosneb mikroarvutist *Raspberry Pi 3*, 7" ekraaniga juhtpaneelist, neljast temperatuurianturist, harukarpidest ja releede plaadist, mille abil on võimalik juhtida kuni kaheksat eri lisaseadet. Joonisel 2.4 on välja toodud seadme prototüübi esialgne lahendus:



**Joonis 2.4.** Seadme prototüüplahendus

Seadme mõõdetava ala määratlemiseks on lisatud anduritele lasermoodul, mis on suunatud sarnaselt anduri vaateväljale. Seade võimaldab mõõta temperatuuri soovitud vahemikus, ning tulevikule mõeldes võimaldab vastavalt protsessi iseloomule protsessi automatiseerida ning andmehõive abil teostatud analüüsi korral seadet paremini seadistada. Joonisel 2.5 on välja toodud prototüüp seadme plokk skeem:



**Joonis 2.5.** Prototüübi plokk skeem

Seadme prototüübi eelis võrreldes konkureerivate pakutavate toodete ees on selle hind, mis on ligikaudu 600 €. Vähendades kasutatava ekraani suurust ja releelülituste hulka on võimalik hinda veelgi vähendada. Samas säilib võimalus lisada juurde vähemalt kuni 100 sarnast andurit, mis vajaduse korral juba ületaks kordades konkureerivate toodete hinna. Sealjuures väga kaotamata omaduste arvelt.

### 2.3. Valminud kontroller (*Raspberry Pi baasil*)

Seadme juhtimiseks on välja valitud mikroarvutite nomenklatuurist *Raspberry Pi 3*. Kuna andmemaht saja mõõtmise korral neljalt andurilt koos anduritemperatuuri, objektitemperatuuri ning kuupäeva ning kellaaja väärtusega on suurusjärgus 10 kB, siis vähem kui 3200 mõõtmisega oleks ületatud näiteks Arduino Uno 32 kB flash mälu maht [11].

Täiendavate lisaseadmete või erinevate mikrokontrollerite kasutamisel on võimalik seda mahtu tunduvalt suurendada, küll aga on tähtis programmeerimiskeel, mis nõuab ümberõpet juhul kui neid kasutada tahaks. Kirjeldatud mikroarvuti *Raspberry Pi 3* omadused on välja toodud tabelis 2.1:

**Tabel 2.1.** *Raspberry Pi 3* andmed [12]

Nimetus	Väärtus
Nelja tuumaline protsessor	1.2 GHz, 64-bit (BCM2837)
Muutmälu	1 GB
Juhtmevaba lokaalvõrk ja bluetooth	(BCM43438)
Sisend/väljundviikude arv	40 tk
USB 2 portide arv	4 tk
Toitevool	2.5 A

Lisaks on *Raspberry Pi 3*-le võimalik lisada suurendatud väärtusega mälukaart, hetkel on mälu 16 GB, mis on enam kui piisav salvestamiseks sadu tuhandeid mõõtmisi, arvestades asjaolu, et 100 mõõtmistulemuse kirjutamine faili hõlmab 10 kB kõvakettaruumi ja vähemalt 12 GB vaba kõvakettaruumi on võrdeline 1,2 miljoni sarnase kirjutuskorraga, seega 333 tundi töötundi, mis on rohkem kui vajalik, arvestades seadme kasutustihedust.

Mikroarvuti juhtimiseks kasutatakse puutetundlikku *LCD* ekraani tootjalt *Nextion*. Konkreetse valitud mudeli nimetus on *Nextion-NX8048T070*. [13] Selle omadused on järgnevalt välja toodud tabelis 2.2:

**Tabel 2.2.** *Nextion NX8048T070* andmed [13]

Nimetus	Väärtus
Ekraani resolutsioon	800 × 480
Ekraani ühendusviis	UART ühendus
Ekraani diagonaali suurus	7,0"
Trükiplaadi suurus	181 × 108 mm
Kaal	350 g

Ekraaniga ühenduse loomine tähendab lisaks mõningaid protseduure *Linux*i operatsioonisüsteemi terminalis. Nimelt on vajalik *Bluetooth* mooduli ühenduse katkestamine antud olukorras. Kuid on ka teisi lahendusi juhul kui seda tarvis kasutada.

Valitud ekraan on sisse ehitatud kasutajaliidesega. See tähendab, et ekraanil kuvatav kasutajaliides on sõltumatu mikroarvutist. Ekraani kasutajaliidese abil juhitakse arvutit ja

kuvatakse arvuti abil mõõdetud suurusi. See omakorda loob sarnase olukorra nagu programmeeritavate mikrokontrolleritega.

Seadme käivitamisel avaneb graafiline kasutuskeskond, sealjuures ei kuvata traditsioonilist operatsioonisüsteemi avakuva, kuid millega on täiendavate lisaseadmete olemasolul võimalik samaaegselt suhelda.

*VNC (Virtual Network Computing)* graafilise andmesidelahenduse abil on võimalik ühendust luua kontrolleriga igal ajal selleks eelnevalt seadistatud suhtlusvahendiga. Tingimusteks on sama lokaalvõrgu kasutamine või traadita andmesidelahenduse kasutamine.

Seejärel on võimalik juba näha *Raspberry Pi* avakuva, mida erinevalt puutetundlikult ekraanilt näha ei ole. Seadme oleku kontrollimine on tehtud võimalikuks vastava kirje ilmumisega avakuvale, mis tekib programmi käivitamise järgselt. Kui seda mingil põhjusel ei peaks tekkima, siis tuleb otsida ja süveneda võimalikesse vigadesse.

## **2.4. Valminud graafiline keskkond**

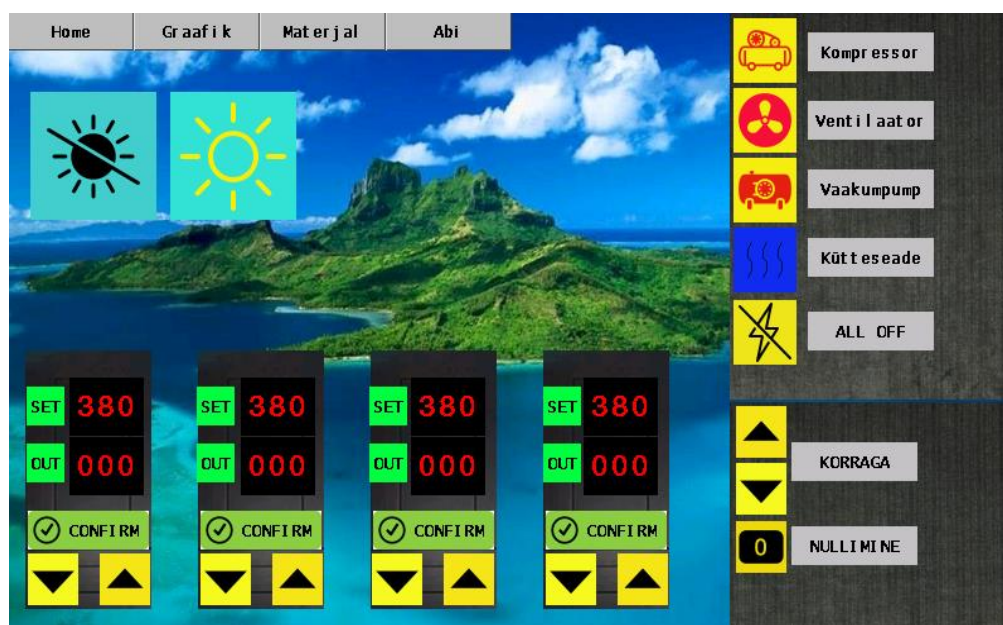
Kontrolleri juhtimiseks graafilise keskkonna abil on välja valitud puutetundlik *Nextion TFT LCD* ekraan 800×480 resolutsiooniga ja seitsme tollise ekraani diagonaaliga. Graafiline keskkond luuakse programmi *Nextion Editor* abil, kus on võimalik lisada erinevaid funktsioone ja isikupärastada loodav kasutajakeskkond. [13]

Kõik lisatud nupud väljastavad lihtsamalt öeldes vajutamise korral *ASCII* koodi, mida on võimalik *serial* ühenduse kaudu lugeda ja kirjutada. Tegemist ei ole tavalise puutetundliku monitoriga, vaid *UART* seadmega (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), mis sisuliselt hõlmab endas programmeeritavat mikrokiipi. [13]

Põhjus, miks ei saa kasutada ainult monitori protsesside juhtimiseks ja on vajadus mikroarvuti järele, seisneb selle mõningates puudustes – mälumaht on piiratud ja väljund pole piisavalt robustne, et taluda releelülitisi.

Nimelt programmeerimise ajal sisestatud mälukaart kasutatakse ära küll programmi peale laadimiseks käivituse ajal, kuid seda ei saa kasutada hilisemalt seadme püsimäluna.

Tõepoolest, pakutakse ka edasiarendatud versioone taolistest monitoridest, kuid lisakulutused antud projekti juures ei võimaldaks siiski kõike seda teha, mida *Raspberry Pi* kaasabil võimalik on. Monitori käivitudes ilmub koheselt ekraanile järgnev, mis on toodud välja joonisel 2.6:



**Joonis 2.6.** Graafiline keskkond

Graafilise keskkonna abil on võimalik reguleerida nelja temperatuuritsooni eraldi, teha releelülitusi nagu kompressori sisse ja välja lülitamine, ventilaatorite käivitamine või kõikide seadmete töö seisata.

Võimalikkus tulevikus seadistada emissioonitegurit vastavalt materjalile ja vaadata graafikutelt, kuidas seade on temperatuuri mõõtnud ning selle põhjal teha järeldusi. Samuti on võimalik programmi igal ajal lihtsalt muuta ja täiendada ekraanil kuvatut.

Valitud monitor ei edasta otse *Raspberry Pi* avakuva, ühenduse loomine arvutiga käib praegusel juhul interneti olemasolul *VNC (Virtual network computing)* virtuaalse ühenduse kaudu. [14] See võimaldab kiirelt ja lihtsalt seadistada ümber juhtprogrammi vastavalt vajadusele.

Viimane eeldab siiski eelnevat automaatse võrgurežiimi seadistamist. Antud viisi abil on võimalik ka ühendus luua nutitelefone ja *Raspberry Pi* vahel, sedasi on võimalik täiendavalt seadeid muuta täiendavaid vahendeid kaasas kandmata.

Programmeerimiskeele *Python* abil loodud juhtprogrammi käivituses on võimalik muuta teksti ekraanil, mille abil on võimalik eristada kas juhtprogramm käivitus ja kontrolleri töötab või on esinenud mingeid tõrkeid. Digitaalse juhtsüsteemi korral seiskub kontrolleri veakoodi ilmnemisel, kui katkeb ühendus näiteks mõne temperatuurianduri ja arvuti vahel. Sarnase tööpõhimõttega on ka tööstuses laialt kasutatud sagedusmuundurid, mis enamasti ülekoormuse või tõrke korral kuvavad veakoodi ja seiskavad juhitava seadme.

Tulevikus on võimalik loodud juhtseadme abil automatiseerida täielikult seadme töö ja seda suhteliselt lihtsate programmimuutuste abil.

## **2.5. Ekraani korpus**

Selleks, et kaitsta puutetundlikku ekraani välise keskkonna eest, on kaitstud see ümbrisega. Kuna tavalisele *Nextion* ekraanile ei pakuta otseselt ümbrist, vaid 3D printimise teenust koos failiga vastava korpuse printimiseks, siis sai ajakasutuse huvides tellitud universaalne seitsme tollise ekraani ümbris.

Ekraani paigalduseks korpusesse tuli puurida uued avad. Ekraani trükiplaat on vertikaalses suunas ohutu puurida, kuna mikroskeemi rajad paiknevad mujal. Joonisel 2.7 on välja toodud puuritud kujul ekraani paigaldusjoonis:

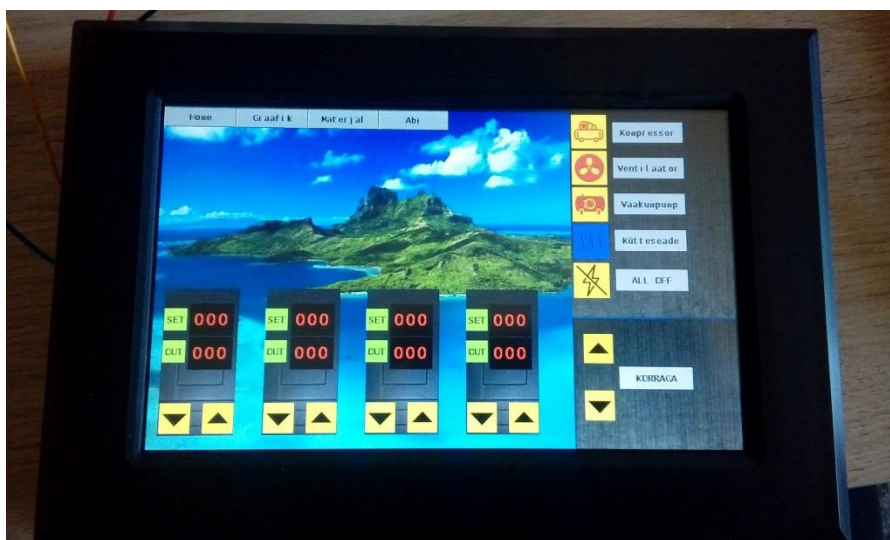




**Joonis 2.7.** Ekraani mooduli kinnitus kestas

Sellisel teguviisiil nagu ülemisel joonisel on ka mitu halba omadust: kaob garantii ja oht vigastada tegevuse käigus ekraani ennast. Kuna töö autori eesmärgiks oli valmistada prototüüp, siis ei omanud tähtsust ideaalne koostesobivus, vaid toimiv töökindel lahendus.

Soovides ideaalset koostesobivust, tuleks tellida spetsiaalselt valmistatud 3D mudeli abil valmistatud ümbris. Kuid antud eesmärgi täitmiseks sobis ka praegune lahendus. Koos ümbrisega näeb lahendus välja järgnev nagu on toodud joonisel 2.8:



**Joonis 2.8.** Ekraani mooduli kujundus

Kuna korpuse ja ekraani vahele jääb ka mõningane tühimik, siis on võimalus katta puutekraan täiendava kaitsekilega või õhukese plastilehega, vältimaks ekraani kahjustamist

ja tehes selle vähem vastuvõtlikumaks erinevate töökeskkonna tegurite suhtes. Paneel ise on kinnitatav kruvidega plaadi sisse süvistatud kujul. Mis tulenevalt kasutuskohast, kuhu paneel kinnitub on igati sobiv (kompaktplaat).

### 3. MATERJAL JA METOODIKA

#### 3.1. Lehtmaterjali pinnatemperatuuri mõõtmise erinevad meetodid

Pinnatemperatuuri mõõtmine plastikust lehtmaterjali korral on mõnevõrra keeruline. Mistahes kontakti loomine pinnaga võib kergesti kriimustada materjali kahjustades selle pinnakvaliteeti kui ka hilisema vaakumvormimise käigus luues potentsiaalse koha, mis rikub hermeetilisuse vaakumlaua ja lehtmaterjali vahel.

Probleemi süvendab ka asjaolu, et materjal ei püsi konstantselt paigal, vaid temperatuuri mõjul hakkab liikuma teadmata suunas. Asetades anduri lihtsalt lehtmaterjali pinnale võib juhtuda, et anduri abil ei mõõdeta piisavalt täpselt temperatuuri kehva kontaktpinna tõttu.

Tänapäeval toodetakse ka termopaare, mis on kohandatud pinnatemperatuuri mõõtmiseks, enamasti näevad välja need analoogsed nagu joonisel 3.1 väljendatu:



**Joonis 3.1.** Pinnatemperatuuri termopaar [15]

Taolise termopaari erinevus võrreldes tavalisega seisneb peamiselt laia lehekujulise, vahel ka kleepimisvõimalusega lisaplaadi olemasolus. Paraku taoliste termopaaride puuduseks on siiski nende suurenenud mass, mis tähendab, et anduri soojenemiseks ja jahtumiseks kuluv aeg võib jääda pikaks, et protsessi täpselt juhtida oleks võimalik. Samuti ületab hind vaatluse all olevate infrapuna temperatuuriandurite oma. Olles hinnaga alates 40 € tükk.[15]

Teine võimalus pinnatemperatuuri mõõtmiseks on kasutada infrapuna temperatuuriandureid. Nende andurite abil on võimalik sõltuvalt kasutatavast optikast mõõta kontaktivabalt keskmistatud pinnatemperatuuri.

Kuna anduri vaateväljas on termopatarei, mis sisuliselt kujutab endast hulganisti termopaare reas, siis saame keskmistatud temperatuuriväärtuse. Oma olemuselt tähendab see seda, kui mõõta näiteks põleva küünla temperatuuri, saame anduri poolt loetavaks väärtuseks ligi 300 °C. Tegelik leegi temperatuur on aga suurem kui 800 °C.

Kuidas selline näit kujuneb on ümbritsevate temperatuuride keskmine, meetri kauguselt mõõtes on mõõdetav ala ligi 0,1 meetri suuruse diameetriga. [17] Liites ümbritsevad temperatuurid, laua pinnal 23 °C, küünla vahetus ümbruses 60 °C saame aritmeetilise keskmise temperatuuri väärtuseks 300 °C.

Sellise mõõtmise tulemusega pole just palju peale hakata, küll aga mõõtes lehtmaterjali pinnatemperatuuri, mis kõigub materjali ulatuses mõne °C ulatuses, saame arvestatava keskmistatud temperatuuri väärtuse, mille abil juba on võimalik protsessi juhtida. Joonisel 3.2 on välja toodud tüüpiline infrapuna temperatuuriandur, mis vaadeldavas temperatuurivahemikus mõõtmiseks sobida võiks:[16]



**Joonis 3.2.** Infrapuna temperatuuriandur [16]

Nagu termopaaride korral, lähtuvalt mõõtevahemikust, on tarvis kaitsta andurit kõrvaliste mõjude eest. Enamasti on taoliste infrapuna temperatuuriandurite talutavaks

anduritemperatuuriks ligi 125 °C, millest suurema väärtuse korral väheneb näiteks anduri *EEPROM* mälu kirjutuskordade arv, ja väheneb mõõtetäpsus vastavalt. [17]

### 3.2. Kasutatavad andurid

Kasutatavateks anduriteks on valitud kontaktivabad *CJMCU-MLX90614ESF-DCI* infrapuna temperatuuriandurid. Andureid on kokku neli. Andur väljastab 17-bitise digitaalse koodi, kasutades *I2C* ühenduse protokoll. Andur näeb välja järgnev: [17]



**Joonis 3.3.** Kasutatava anduri välimus [17]

Anduri ühendusviigud on lisatud kaasa, kuid pole füüsiliselt joodetud trükiplaadi külge paremaks sobivuseks teadmata projekti vajadusi. Tajur on mustkeha abil eelnevalt tehases kalibreeritud. [17]

Anduril on sisse ehitatud analoog-digitaalmuundur, digitaalne signaaliprotsessor, ja signaalivõimendi. [17] Samuti on lisatud takistid ja muud komponendid, mida tuleks kasutada juhul kui soovida kasutada andurit mikroarvutiga suhtlemiseks.

Seega on andur võimalik koheselt kasutusele võtta ilma kalibreerimata. Siiski kasutades mitut erinevat andurit, võib olla tarvis andurite väärtused omavahel ühtlustada, vastasel juhul tekiks olukord, kus mõõteerinevuste tõttu koetakse lehtmaterjali ebaühtlaselt.

Tehasepoolne kalibreerimise tulemusel peaks kõik sarnase koha mõõtmisel andurite näidud võrdsetes keskkonnatingimustes ja isothermilistes tingimustes olema võrdväärsed. [18]

Seetõttu sarnaste tingimuste saamiseks, on tähtis andur ümbritseda vastava kestaga. Prototüüpimiseks valmistati ABS plastikust anduri kaitseümbrised. Plastikul on metalli ees mõningasi eeliseid, näiteks elektrijuhtivus, mistõttu ei teki lühist trükiplaadi korpuse vastu puutumisel.

Vaadeldavas lõputöös kasutatava anduri parameetrid on väljendatud joonisel 3.1: [17]

**Tabel 3.1.** Anduri „MLX90614“ parameetrid [17]

Parameeter	Väärtus, ühik
Anduri temperatuuritaluvus	−40...+125 °C
Mõõteobjekti mõõtevahemik	−70... +380 °C
Maksimaalne mõõtetäpsus	0,5 °C
Resolutsioon	0,02 °C
Maksimaalne mõõtekaugus optikal	1,16 m
Optika suurendusvõime	11,6 : 1
Toitepinge anduri tajuril	5,5 V
Anduri poolt tarbitav vool	13,5 mA
Maksimaalne arv andureid ühenduses	127 tk

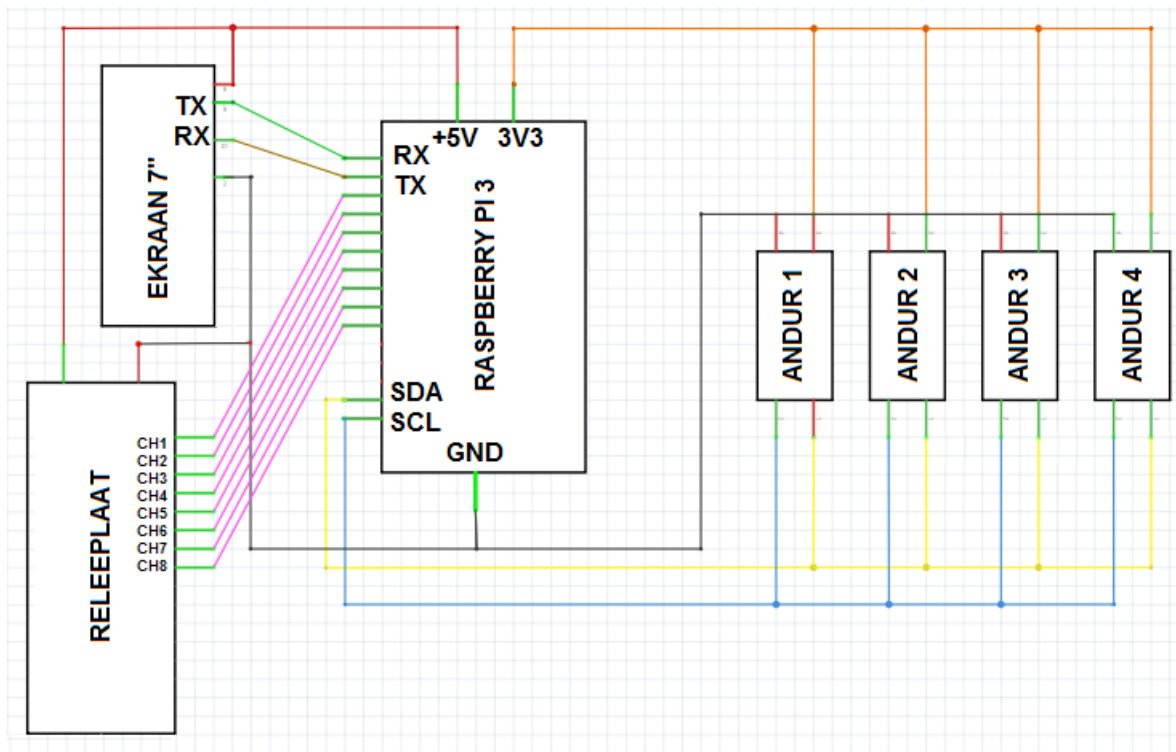
Selleks, et paremini mõista, millise täpsusega antud andur võimeline mõõtma on, on tähtis teada järgnevat. Üldiselt termoplastide vormimise korral temperatuuri vahemik 0– 50 °C pole väga oluline, enamik töötlusoperatsioone jääb vahemikku 140– 205 °C ja töötluseks vajaliku eelnevate kuumutusoperatsioonide korral temperatuuride vahemik 65– 90 °C pikema aja vältel. [19] Mõõtetäpsus anduri keskkonnatemperatuuri väärtuse vahemikuga on toodud tabelis 3.2:

**Tabel 3.2** Anduri MLX90614 mõõtetäpsus [19]

Objekti temperatuur	Mõõtetäpsus (0 – 50 °C)	Mõõtetäpsus (50 – 100 °C)	Mõõtetäpsus (100 – 125 °C)
0– 50 °C	±0,5 °C	±1 °C	±2 °C
60– 120 °C	±1 °C	±1 °C	±2 °C
120– 180 °C	±2 °C	±2 °C	±2 °C
180– 240 °C	±3 °C	±3 °C	±3 °C
240– 380 °C	±4 °C	±4 °C	±4 °C

Tabelis 3.2 kujutatu põhjal lähtub, et anduri mõõtetäpsus lõputöös vajalikus mõõdetavas piirkonnas jääb vahemikku ±1...3 °C. Seda tingimusel, et ei ole eksitud materjali emissiooniteguriga.

Kõikidel anduritel on sisse programmeeritud aadress *EEPROM* mälus, milleks on  $0 \times 5a$ . Selleks, et lugeda erinevate andurite väärtusi, on tähtis, et neil oleks erinevad sisemised aadressid. Selle probleemi lahendamiseks on kaks võimalust: kasutada aadressi muutmist või multiplekserit. Aadressi muutmise korral on võimalik kuni 127 andurit ühendada järgnevalt sarnaselt joonisele 3.4:



**Joonis 3.4.** Andurite ühendamine

Antud juhul on juhtarvutiks *Raspberry Pi* ja andurid ühendatakse järgi rööpühenduse abil. Anduritelt saadud väärtus kuvatakse arvuti vahendusel ekraanil, ekraanile sisestatud väärtuste abil juhitakse releelaati. Andureid saab dokumentatsiooni uskudes lisada kuni 127 tk. Tingimuseks on erinevate anduri aadresside kirjutamine *EEPROM* mälusse.

Esmapilgul lihtsana näiv ülesanne on tegelikkuses päris keerukas ja raskesti mõistetav. Suurema koguse andurite programmeerimiseks on võimalik soetada anduri tootjalt *EVB90614* nimetusega spetsiaalne trükiplaat, mis võimaldab arvuti abil mõõta temperatuuri kuni kahe anduriga. [20]

Täiendavaks seadistamiseks on loodud juhtprogramm *MlxCirt* (*Melexis configurator for infra red thermometers*) [21]. Paraku on sellise lahenduse kasutamine materiaalse kulutuse poolest ülemäärane, makstes ligi 300 €. [20]

Anduritelt lugemise lahendamine multipleksori abil aga tekitab olukorra, kus samaaegselt andurite väärtusi ei ole võimalik lugeda, ja selleks, et olla kindel õige anduri tulemuse väljastamises peaks olema vaheaeg mõõtmiste vahepeal selline, mis välistaks valesignaali jõudmise ekraanile. Mis omakorda aga muudab süsteemi aeglaseks ja vähem töökindlaks.

Kuna kõikidest läbiproovitud variantide korral *EEPROM* mälus aadressi muuta ei õnnestunud, siis sai otsustatud proovida anduri koodi muutmist *Arduino Uno R3* abil. Internetis leiduvate näidete puhul prooviti läbi kõik *Python* programmeerimiskeeles leiduv, kui ka *C* programmeerimiskeeles leiduvad näited.

Viimaseid modifitseerides ei õnnestunud kuidagi muuta füüsiliselt *EEPROM* mälus leiduvat aadressi. Kindlasti on võimalik seda teostada, kuid arvestades töö autori piiratud programmeerimiskogemust, ja ülesande keerukusastet, siis jäi viimane sellisel viisil teostamata.

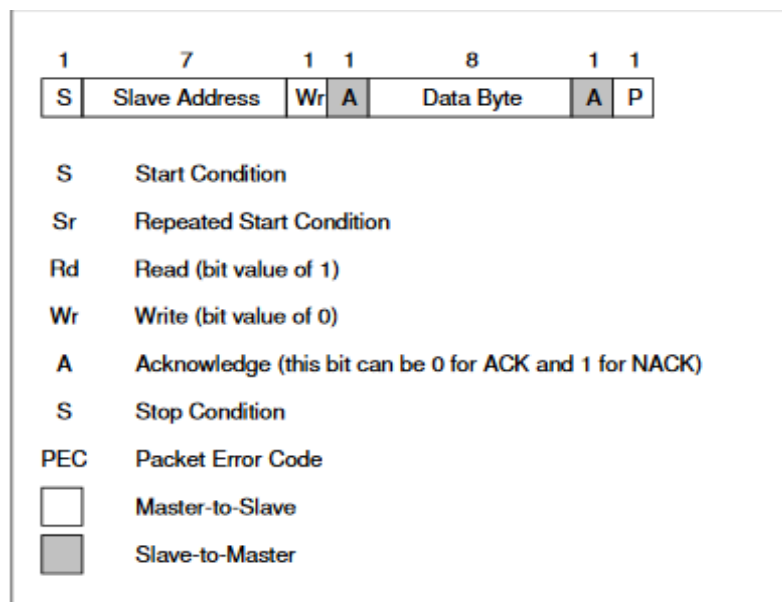
Selleks, et *EEPROM* mälusse kirjutada võimalik oleks, on tähtis praegune mäluaadress sealt kustutada, seda saab teha järgnevalt, kirjutades sinna väärtuseks „0×00“ ja seejärel toiteahela katkestamisega anduri ja arvuti vahel, mille tagajärjel kustutatakse seal olev väärtus ja mille järel kirjutatakse mälusse uus väärtus.

Andurile uue väärtuse kirjutamiseks on tähtis antud kirjutamise protsessi korrata 256 korda, see on vajalik selleks, et ei peaks arvutama väga täpset väärtust polünoomile, mis kontrollib andurile kirjutatavat informatsiooni, ja vale väärtuse esitamise korral eirab infot. *PEC* ehk „*Packet Error Checking*“ on *Smbus* ühenduse korral kontroll-lüli, mis vigade korral väljastab veakoodi, sarnaselt autodel kasutusel olevale infosüsteemidele. [22]

Anduriga ühenduse loomise korral on tähtis täita kõik ühenduse loomise protokolliga osad. Vastasel juhul tagasisidet andurilt ei õnnestu saada. Selle lihtsustamiseks on loodud mitmed täiendavad alamprogrammid, mis teevad anduriga suhtlemise mõnevõrra lihtsamaks.



Näiteks saadavad mitmekordsed starditingimused ja arvutavad välja automaatselt eelnevalt mainitud *PEC* koodi. Anduriga ühenduse loomise protokoll on välja toodud joonisel 3.5:



**Joonis 3.5.** Anduri ühendusprotokoll [22]

Arvutades *PEC* väärtust hõlmab see endas kõiki bittide peale „start, korduvstart, stop, ACK ja NACK“ bittide. Kirjeldatud *PEC* arvutuse korral on tegu tsüklilise kontrolliga polünoomi väärtusega  $y = X^8 + X^2 + X^1 + 1$ . Tsükliline kontroll ehk *CRC-8*, mis kontrollib anduri poolt väljastatava info sarnasust eelpool toodud polünoomi väärtusele. Kui see erineb viimasest rohkem kui lubatud, kuvatakse veakood. [22]

Anduri aadressi muutmiseks *Arduino Uno* abil tuleb kirjutada järgnev kood *Arduino IDE* tarkvarapaketi abil mikrokontrolleri mälusse, mis on toodud lisas B. [23] Antud koodi sisestamise järel tuleb katkestada anduri toiteahel, mille tagajärjel kirjutatakse anduri mälus väärtus ringi.

Anduri aadressi muutmise korral on tähtis, et korraga oleks ühendatud vaid üks andur järele. Samuti on tähtis lisa loendite ja teekide allalaadimine ja lisamine *Arduino IDE* nimelise tarkvara abil. Viimaste loetelu on välja toodud anduri koodivahetuse koodi päises. Nagu näiteks *i2cmaster* lisateek.

Pärast vastavate protseduuride teostamist ühendati andurid *Raspberry Pi 3* arvutile järgi vastavalt ühendusskeemile, mis on välja toodud eelnevalt joonisel 3.4. Muutunud aadressi kontrollimiseks tuleb sisestada järgnev käsklus *Raspberry Pi 3* terminali: „*i2cdetect -y 1*.“ Seejärel õnnestunud toimingu korral kuvatakse andurid oma vastavatel aadressiviitadel.

Antud juhul valiti andurite aadressideks: 5a, 5b, 5c, 5d. Soovitud väärtus tuleb määratleda *Arduino IDE* tarkvara programmis, modifitseerides vajadusel uue aadressiviida koodi.

Selleks, et tühistada eelnev *Arduino* mällu laetud programm, tuleb laadida sinna vahepeal tühi näidisprogramm, mille järel katkeb eelnevalt mällu kirjutatud programmi kasutamine. Andurite mäluaadressid on selle kontrollimise käsu sisestamise järel terminali nähtavad joonisel 3.6:

```
pi@raspberrypi:~ $ i2cdetect -y 1
    0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  a  b  c  d  e  f
00:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
10:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
20:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
30:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
40:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
50:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  5a 5b 5c 5d  --  --
60:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
70:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
```

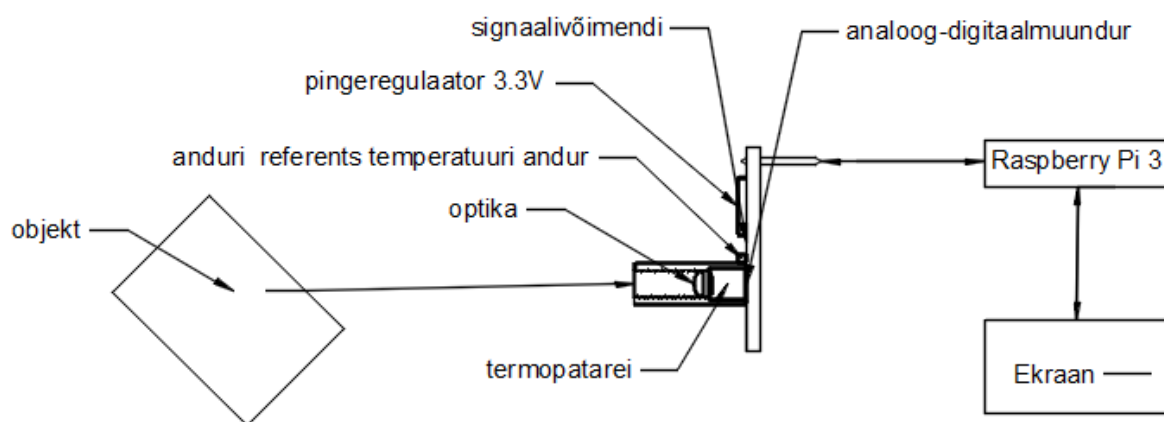
**Joonis 3.6.** Temperatuuri andurite aadressid

Mäluaadressi valikul tuleb lähtuda asjaolust, et ei kasutataks sarnast aadressi mõne teise lisatud lisaseadmega. Vastasel juhul ei pruugi hilisem ühendus toimida.

Andurilt lugemiseks on vajalik järgnev koodilõik, mis on toodud lisas A. Täiendavalt kirjutatakse väärtused ka faili, mille mõõtmiste arvu on võimalik korrigeerida, koodilõigus „*count = ,*“ kus defineeritakse mõõtmiste hulk, sellele eelnevalt ka mõõtmiste vaheline ajaväärtus, ehk mitu mõõtmist ajaühikus tehakse.

See tähendab seda, väärtuse üks korral, tehakse ühe sekundi jooksul üks mõõtmine ja salvestatakse see, väärtuse vähendamise korral alla selle tehakse rohkem mõõtmisi ja väärtuse suurendamise korral vastavalt vähem.

Järgnevalt on välja toodud joonisel 3.7 temperatuurianduriga lehtmaterjali temperatuuri väärtuse kuvamine ehk ühtlasi ka kontrolleri struktuuriskeem.



**Joonis 3.7.** Kontrolleri struktuuriskeem

Jooniselt selgitab, et objekti temperatuuri keskmistatud väärtus saadakse termopatarei signaalide võimendamise abil. Lisaks mõõdetakse anduri kesta temperatuuri termopaari abil. Seejärel need väärtused töödeldakse analoog-digitaalmuunduri abil digitaalsele kujule mikroprotsessori abil, võimendatakse, loetakse üles mikroarvuti abil ja väljastatakse ekraanil.

Eelpooltoodud skeem on sarnane käsitööriistaga infrapuna temperatuurimõõtmiseks. Viimaste kasutusvõimekus protsessi kontrollimiseks aga on piiratud releelülitusvõimekuse puudumisega, ja võimalusega väljastada loetud andmeid arvutile.

### 3.3. Andurite kaitsmine

Selleks, et säiliks andurite töövõime pikema aja vältel on tähtis kaitsta andureid õhus lendlevate võõrkehade ja kuumuse eest. Nendeks võõrkehadeks võib olla antud juhul tolm, niiskus. Antud juhul oleks sobivaks klassiks *IP 61*. [24]

See tähendab, et anduri korpus on tolmuindel, ja viimane number sellest tähendab, et ka tilkvee eest kaitstud, ehk mistahes vedeliku lendumise korral ei saaks kahjustada või määrduda anduri optika, mis võib põhjustada anduri mõõtetäpsuse langust. [24]

Anduri mõõtetäpsus on väljendatud anduri temperatuurini kuni +125 °C [18]. See tähendab ka seda, et andurit tuleb kaitsta ületemperatuuride eest, vastasel juhul suureneb mõõteviga sellisel määral, et mõõtetäpsuse langus hakkab mõjutama protsessi kontrollimist.

Kuna kõiki materjale omaduslikult infrapuna kiirgus ei läbi, siis on tähtis selgitada, millised võimalused on anduri optika kaitseks. Kattes anduri optika infrapuna kiirgust mitteläbiva materjaliga, tekib olukord, kus loetakse katva objekti pinnatemperatuuri, mitte tingimata mõõdetava objekti pinnatemperatuuri.

Optikast sõltub ka, millisel määral anduri täpsus mõjutatud on. Järgnevalt on välja toodud erinevate infrapuna kiirgust läbivate materjalide omadused koos täiendavate lisamärkustega sobivuse kohta temperatuurianduri optika kaitseks.

**Tabel 3.3.** Erinevate anduri ehitusmaterjalide omadused [25]

Materjal	Peegeldus indeks	Tihedus $\rho$	Lainepikkus $\mu\text{m}$	Märkused
Ränidioksiid ( $\text{SiO}_2$ )	1,46	0,067	3,5	kuni 3,5 $\mu\text{m}$ ( <i>puhastatud kujul</i> )
Polüetüleen	1,54	0,087	8,0	odavad läätsed ja aknad
Kvarts	1,54	0,088	3,5	kuni 3,5 $\mu\text{m}$
Safiir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	1,59	0,100	5,58	keemiakindel, kuni 2000 °C
Räni	3,42	0,462	5,0	sensorite aknad kuni 1500 °C
ZnSe	2,4	0,290	10,6	infrapuna aknad, rabe, kuni 250 °C
Germaanium	4,0	0,529	12,0	aknad ja läätsed kuni 100 °C

Nagu tabelist 3.3 lähtub, on parimaks materjaliks ränidioksiid, teatud ka kui kvartsklaasina, polüetüleen odavamates seadmetes hinnast lähtuvalt. Lisaks ka näiteks safiir oma kõrge keemiakindluse ja temperatuuritaluvuse tõttu.

Seevastu materjalid nagu Germaanium ja ZnSe kasutatakse enamasti infrapuna termomeetrias, täpsemalt termokaamerate ehituskomponentidena, viimastel on head omadused vähesem atmosfääri infrapunakiirguse läbilaskvus, kuid temperatuuritaluvus on piiratud 100 kuni 250 °C, mistõttu igalpool neid kasutada ei ole sobilik. [25]

Lisaks anduritele on tähtis kaitsta ka neid ühendavaid signaalikaableid. Algselt prototüübi valmimisel kasutatud kaabel on  $8 \times 0,5 \text{ mm}^2$  ja temperatuuritaluvusega maksimaalselt kuni +70 °C nagu on väljendatud analoogsete pakutavate kaablite korral. [26] Täiendavalt tuleks

esialgselt kasutatud kaablid vahetada välja kõrgemat temperatuuri taluvate kaablite vastu. Kaablite puhul on kasutatud siiski isolatsiooniga kiudsoontega juhete massiivsoone asemel.

### 3.4. Emissioonitegur

Selleks, et mõõtmine oleks võimalikult täpne, on vaja korrigeerida emissioonitegurit. Seda saab teha mitmeti. Kirjutades väärtuse ringi anduri mälus, või viies läbi kontrollmõõtmised ja arvutused temperatuuri väärtuse korrigeerimiseks.

See protsess näeb välja järgnev: viia läbi mõõtmine täpse kalibreeritud termomeetri abil või värvides mõõdetava objekti mustaks suure emissiooniteguriga musta värviga. Reaalne objektitemperatuur on sedasi mõõdetav ühe anduri abil, mille vaateväli on suunatud mustale värvitud alale, ja emissiooniteguri saab kindlaks teha teise anduriga, mis vaatab värvimata alale. [28]

Emissiooniteguri automaatne kompensatsioon on arvutatav valemi 3.1 abil: [28]

$$\varepsilon = \frac{T_{ouus}^4 - T_{auus}^4}{T_{oteg}^4 - T_{ateg}^4} \quad (3.1)$$

kus  $T_{ouus}$  on anduri poolt mõõdetud objekti temperatuur K;  
 $T_{oteg}$  – objekti tegelik temperatuur K;  
 $T_{auus}$  anduri uus mõõdetud temperatuur K;  
 $T_{ateg}$  – anduri tegelik temperatuur K.

Arvutuseks vajalike toimingute hulka kuulub näiteks objekti kuumutamine stabiilsele kõrgemale temperatuurile, mis võiks olla vähemalt 30 °C kõrgem kui anduri enda temperatuur, näites kasutatakse väärtust 60 °C. Järgnevalt viiakse läbi mõõtmised viisil nagu kirjeldatud eespool (kaks erinevat võimalust). Mõõtmiste tulemusel saadi väärtused vastavalt 60 °C objekti temperatuuriks ja 25 °C anduri temperatuuriks. [28]

Järgnevalt tuleb mõõta temperatuur *MLX90614* anduri abil ja kirjutada välja saadud väärtused. Anduri enda registreeritud mõõtmiste tulemusel saadi temperatuuriks 40 °C objekti temperatuuriks ja anduri enda temperatuur võiks jääda samaks juhul kui tingimused

vahepeal ei ole muutunud mõõtmise käigus. Mõõdetud temperatuurid tuleb konverteerida Kelviniteks, mida saab teha liites °C väärtustele 273,15. Asetades saadud tulemused valemisse saame järgneva:

$$\varepsilon = \frac{(40 + 273,15)^4 - (25 + 273,15)^4}{(60 + 273,15)^4 - (25 + 273,15)^4} = \frac{9,6163 \cdot 10^9 - 7,9020 \cdot 10^9}{12,3185 \cdot 10^9 - 7,9020 \cdot 10^9} = 0,3882$$

Saadud tulemuste korral saadi emissiooniteguri väärtuseks 0,3882. See väärtus tuleb kirjutada *MLX90614* anduri *EEPROM* mälusse, mille tagajärjel muutub anduri poolt väljastatav väärtus soovitud suunas *Arduino* koodi abil, mis on toodud lisas C.

Lisades anduri ette kaitseklaasi, tuleb samuti korrigeerida emissioonitegurit. Millised neist sobivad on, on käsitletud eelnevas töö osas: „anduri kaitsemine.“ Selle arvutamine on mõnevõrra lihtsustatud, kuna saame kasutada andurit ennast muutuste tuvastamiseks.

Sarnaselt eelneva emissiooniteguri arvutamise viisiga, tuleb ka antud juhul kuumutada mõõdetav objekt ümbritsevast keskkonnast kõrgemale temperatuurile. Teha kontrollmõõtmised sama anduriga ja kirjutada välja anduri poolt mõõdetud väärtused. Antud juhul näiteks 60 °C objekti temperatuuriks ja °C anduri temperatuuriks. [28]

Järgnevalt tuleks lisada kaitseklaas anduri optika ette, õige tulemuse saamisel on tähtis, et nii andur kui ka kaitseklaas oleks samal temperatuuril, vastasel juhul tekib mõõteviga. Kontrollmõõtmiste läbiviimisel saadi objekti temperatuuriks 50 °C ja anduri uueks temperatuuriks 25 °C. Üldiselt peaks anduri temperatuur jääma mõõtmiste jooksul samaks. [28]

Tulemuste põhjal arvutati uus emissioonitegur andurile vastavalt:

$$\varepsilon = \frac{(50 + 273,15)^4 - (25 + 273,15)^4}{(60 + 273,15)^4 - (25 + 273,15)^4} = \frac{10,9047 \cdot 10^9 - 7,9020 \cdot 10^9}{12,3185 \cdot 10^9 - 7,9020 \cdot 10^9} = 0,6799$$

Arvutuste põhjal saadi uueks emissiooniteguriks 0,6799. See väärtus tuleks kirjutada anduri mälusse juhul kui kasutatakse kaitseklaasi anduri optika ees. Kuna andureid ise on kokku

kasutusel neli analoogset siis on võimalik sooritada nii ühel kui teisel juhul uue emissiooniteguri arvutamist, et säiliks mõõtetäpsus.

### **3.5. Pooljuhtreleed kontrolleri lülituste tarvis**

Selleks, et kontrolleri võimekus ei jääks alla tänapäevastele kasutusel olevatele, on tähtis kasutada pooljuhtreleesid. Selleks, et ei rikneks kasutatav mikroarvuti, on tähtis, et releede plaadil oleks ka vahel takistid, mis piiravad voolutugevust lülituse ajal. Sealjuures tuleks see üle mõõta ja selles veenduda.

*Raspberry Pi* väljundi koormatavuse kohta infot otsides selgub, et maksimaalselt võib kasutada 51 mA koormust, ja seda selliselt, et iga *GPIO* viigu summaarne koormus ei ületaks 51 mA, mida on võimalik seadetes seadistada. [29]

Mõningane hetkeline ülekoormus ei pruugi avaldada kohest mõju, kuid pikemas perspektiivis on tarvis seda jälgida. Selleks, et vältida potentsiaalseid rikkeid kontrolleri toimimises, äärmisel juhul ka täielikku riknemist.

Esialgselt kavandatud kaheksa kanaliga pooljuhtreleede plaadil olevad releed on töövooluga 18-25 mA [30], sellest lähtub, et ühes mälupangas saab neid üheaegselt lülitada kaks korraga, ilma, et tekiks ohtu väljund üle koormata. Praktika on näidanud, et liialt suure hajutatud koormuse korral lülitub arvuti enne välja, kui kahjustuda jõuab.

Samuti kasutatakse valitud pooljuhtreleede plaati, mõnevõrra suuremate koormuste lülitamise vaheetapina. Nimelt on kavandatud kaheksa kanaliga releede plaadi järele pooljuhtreleed maksimaalse lülituskoormusega 40 A relee kohta, mille abil juhitakse infrapuna kütteelemente.

Pooljuhtreleed on elektroonilised lülitusseadmed, mis võimaldavad lülitada koormusi kui rakendada toitepinge nende sisendklemmidele. Selles puuduvad mehaaniliselt liikuvad osad. Relee võib olla loodud kas alalisvoolu või vahelduvoolu koormuse lülitamiseks. [31]

Nende abil on võimalik lülitada edukalt kuni 100 A suuruseid voolutugevusi. Võrreldes elektromehaaniliste releedega on neil suurem lülituskiirus ja lisaks puudub kontaktide mehaaniline kulumine. [31]

Enamus pooljuhtreleesi on optiliselt eraldatud mikrokontrollerist, võimaldades sedasi lülitada probleemideta ka suuremaid voolusid ja kõrgemaid pingeid, kui taluks mikrokontrolleri väljund. [32]

Esmaselt kavandatud pooljuhtreleed näevad välja sellised nagu joonisel 3.8:



**Joonis 3.8.** pooljuhtreleede plaat

Pooljuhtreleede tüübi valikul, tasub tähele panna, milliseid koormuseid sellega lülitada kavatsetakse. Näiteks valitud releede plaat võimaldab lülitada alalispingel töötavaid seadmeid. Sisend on juhitav alalispingega ja väljund on samuti alalispingel töötav.

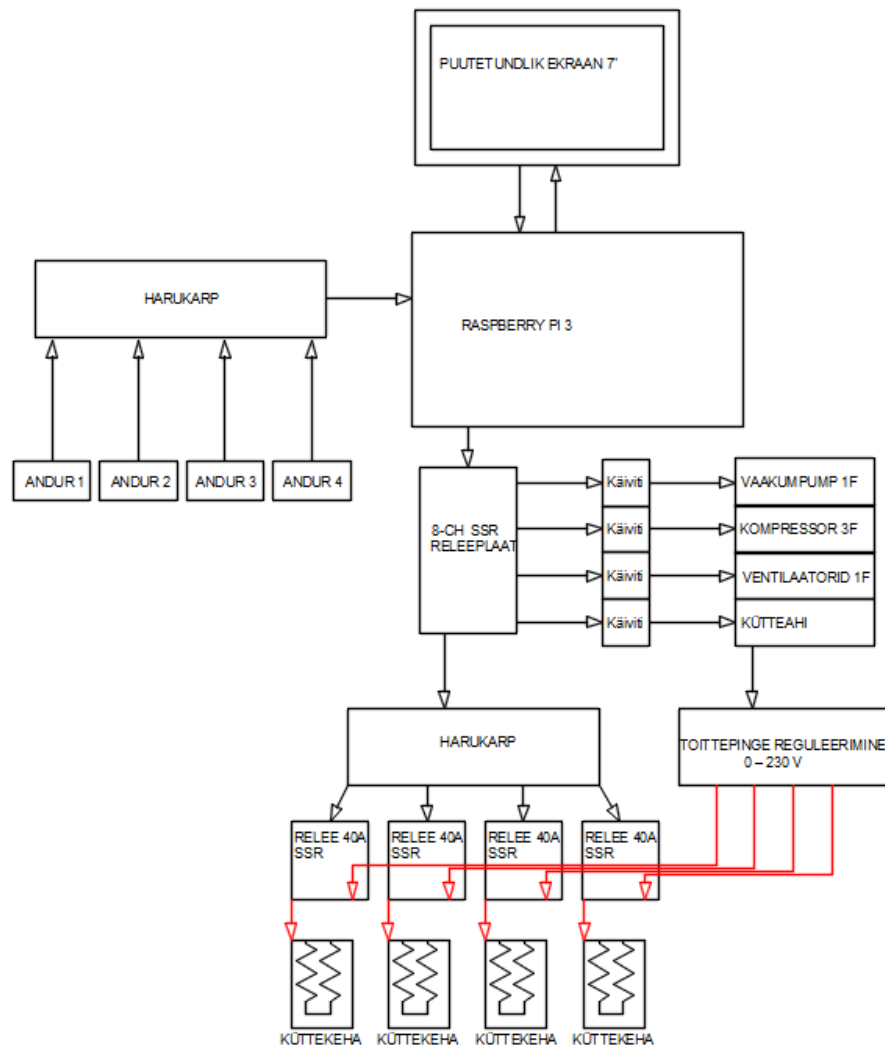
Kui valida vahelduvpingel töötava väljundiga releed, siis sellisel juhul ei ole võimalik lülitada alalispingel töötavaid seadmeid, kuna puudub relee seisu nulliv komponent, mis vaheldupinge korral teatud ajaväärtuse korral esineb. See tähendab, et lülitus saaks toimuda, tuleks mehaaniliselt ahel lahti või kokku ühendada. Sellisel juhul kaoks aga releelülituse mõte.



Pooljuhtreleesi releede plaadil kasutatakse suuremate kuni 40 A pooljuhtreleede juhtimiseks, sedasi on tagatud optiline isoleeritus kontrollierist ning on välistatud seadme juhitavate komponentide riknemise või lühise korral tagasiulatuv mõju kontrollierile.

Pooljuhtreleede kasutamine kolmefaasiliste tarbijate lülitamise korral tulenevalt eriotstarbelise pooljuhtrele vajadusest pole põhjendatud. Seega kasutatakse tavalist elektromehaanilist käivitit taoliste seadmete lülitamiseks.

Kuna releelaadil asuvate pooljuhtreleede väljundpinge vahemik on vahemikus 3–32 V DC, siis sobib see ideaalselt 24 V DC sisendpingega elektromagnetkäivitite juhtimiseks. Järgnevalt on välja toodud terve seadme plokkiskeem joonisel 3.9:



**Joonis 3.9.** Kogu seadme juhtimise plokkiskeem

Joonise puhul tasub juhtida tähelepanu asjaolule, et toitepinge reguleerimine puudutab vaid küttekehade võimsuse reguleerimist, ja ei mõjuta otseselt lisaseadmete käivitamist ja muid toiteahela komponente, mis saavad toite vahetult enne reguleerimiskomponenti.

Kood pooljuhtreleede juhtimiseks on integreeritud koodi, mida kasutatakse programmi juhtimiseks ja on välja toodud lisas A.

### **3.7. Patendiuuring**

Üheks lõputöö osaks on patendiuuring teemal, mida käsitletakse antud lõputöös. Eesmärgiks välja selgitada infrapuna temperatuurimõõtmise abil protsessi kontrollimise lahendused, ja uurida, milliseid variante neist on juba kasutusel ning milline lahendus sobiks kõige paremini tõlgendamiseks antud lõputöö osas.

Suur osa selles on patendiuuringul, välja selgitamaks, milliseid patente antud valdkonnas on juba registreeritud ja kuidas erineb olemasolev lahendus patenteeritud lahendusest. Samuti mõningate ideede genereerimine, teemal, mida tuleks teisiti teha või edasi arendada, et loodud lahendus ei kopeeriks teisi patenteeritud lahendusi.

Patendiuuringu eesmärgiks on määrata kindlaks seadme tehnikatase, selgitada välja peamised otsingusõnad, genereerida arendusideid ja teha kokkuvõtte kõigest eelnevast.

Seadme tehnikataseme määramiseks viidi läbi patendiuuring viidi läbi „Epa.ee“ leiutiste andmebaasi abil lehekülgedel: „*ee.espacenet.com*“ ja „*patents.google.com*.“ Andmebaase kasutades viidi läbi laiaulatuslik uuring kasutades järgnevaid otsingusõnu: „*infrared, temperature, process, controller, non-contact, measurement*.“

Eelnevaid otsingusõnu kombineerides on võimalik saada täpsemaid vasteid, kuid liiga spetsiifiliste otsingusõnade korral on oht, et sobiv vaste võib jääda märkamata mõnevõrra teise nimetuse tõttu. Tulenevalt asjaolust, et tehnikatase on veel selles punktis määramata.

Teemast lähtuvalt on enamus patente antud valdkonnas pärit Ameerika Ühendriikidest, lõputöös käsitletavate patentide loetelus puuduvad patendid mõnest muust riigist. Kuigi

patenditaotlejate päritolumaa võib erineda suuresti riigist, kus patenti taotletakse. See on osaliselt seotud ka asjaoluga, milliseid turgusid antud patendi abil kaitsta soovitakse.

Nii on antud juhul tekkinud ka olukord, kus patent on võetud Ameerika Ühendriikides, kuid patendi taotlejad on päris näiteks Euroopa mõnest riigist, või Hiinast. Patente, mida käsitleda on erinevatest valdkondadest.

Alates toiduainetööstusest, kus kontaktivaba mõõtmise teel on võimalik hinnata valmiva toidu temperatuuri. Kui ka iluteenuste valdkonda kuuluvad seadmed, kus hinnatakse näiteks juuste pinnatemperatuuri nende kuivatamisel. Vastavalt millele kontrollitakse seadme temperatuuri.

Patendiuuringute tulemused ja peamiste otsingusõnade sobivuse väljaselgitamine koos vajaliku analüüsiga on välja toodud tabelis 3.4:

**Tabel 3.4.** Otsingusõnade sobivuse analüüs

<b>Märksõnad</b>	<b>Vasteid, tk</b>	<b>Analüüs</b>
sheet material process controller	228	Rohkem lõiketöötuse kohta kui temperatuuriga seotud
infrared temperature controller	5217	Palju vasteid, vähemalt 4 kasulikku viidet
infrared heating control	7031	Liialt palju vasteid analüüsimiseks, vaja täpsustada, kaks kasulikku viidet
sheet materials thermal process	539	Piisavalt vasteid et analüüsida, kuid puuduvad või ei leitud kasulikke viiteid
infrared thermal process controller	62	Vähe vasteid ja need valdavalt termokaameraga seotud
non-contact temperature measurement	1660	Mõõtmisviiside kirjeldus, kuid otsene seos otsitavaga puudub
sheet materials processing	3970	Ligi kolm kasulikku viidet, liialt palju vasteid analüüsiks

Otsingusõnade kasutamise tulemusel leiti ligi 14 kasulikku patendikirjeldust Samas kui mõnede puhul kasutatava kasuliku informatsiooni osakaal lõputöö osas on olematu. Ja seetõttu pikemalt neid vaatluse alla ei võeta.

Patendi nimetused on ingliskeelsed, tulenevalt ühtse andmebaasi olemusest. Järgnevas tabelis 3.5 on välja toodud patendiuuringu tulemusel leitud patendid, millest mõningaid antud lõputöö käigus pikemalt vaadeldud on:

**Tabel 3.5.** Leitud patentide kirjeldus

Patendi tähis	Patendi ingliskeelne nimetus
US4553011 (A)	Temperature control for microwave oven
US6018144 (A)	Method of conveying moieties through an IR conveyor furnace with controlled temperature profile for large area processing multichip modules
US6121596 (A)	Cooking appliance than can detect temperature of foodstuff using infrared sensor
US5134263 (A)	Infrared heating control
US4424437 (A)	Hair dryer with remote sensing temperature control
US5755041 (A)	Infrared temperature sensing for tumble drying control
US20060029742 (A1)	Apparatus and method for processing sheet materials
US4832885 (A)	Method and apparatus for measuring and controlling thermoplastic foam sheet blow-up
US5730817 (A)	Laminated object manufacturing system
US3813516 (A)	Apparatus for temperature control for a heated rotating cylinder
US20100282741 (A1)	Method for controlling and optimizing microwave heating of plastic sheet
US4933126 (A)	Method and apparatus of temperature control in heat forming of thermoplastic sheet material
US20060118238 (A1)	Process and machine for producing lightweight thermoplastic composite products in a continuous manner
US4156626 (A)	Method and apparatus for selectively heating discrete areas of surfaces with radiant energy

Pärast teemaga sobivate vastete leidmist, õnnestuks kindlaks teha ka *IPC* klass, kuhu leitud patendid valdavalt kuuluvad. Neid klasse oli kolm:

1) Klass B– tööstusoperatsioonide teostamine, transportimine, täpsemalt B29– plastide töötlemine, plastses olekus ainetega töötamine, üldiselt. Eraldi võib välja tuua B29B– ja B29C51/00 ja -/18, ehk termovormimine, lehtmaterjalide töötlemine, sügavtõmbamine ja kujundamine, ning aparatuur selle teostamiseks.

2) Klass H– kuumutamine, täpsemalt H05B6/00– kuumutamine elektri, magnet-, või magnetväljade abil. Lisaks veel täpsemalt H05B6/66– elektriahelad ja H05B6/68– jälgimine ja kontrollimine.

3) Klass G– füüsika, täpsemalt G05– kontrollimine, reguleerimine ja G05F– süsteemid kontrollimaks või reguleerimiseks elektrilisi muutujaid ja G05D23/00– temperatuuri kontroll (automaatkontroll elektrikuumutusel) ja G05D23/27– tundliku elemendiga, mis reageerib kiirgusele.

Kõik eelnevalt väljatoodud patendid vastavad vähemalt ühele neist. Kummalisel kombel on kõik leitud patendid Ameerika Ühendriikidest pärit, mida väljendab ka tähises leiduv *US*.

Tõepoolest leidis ka patente Hiinast, kuid nende tõlgendamine kehva joonise korral ja tundmatu keele puhul on sedavõrd raskendatud, et puudub mõte nende tõlgendamiseks.

Tulenevalt teema mahukusest käsitletakse järgnevalt vaid viite neist:

1) US4553011(A)– mikrolaineahju temperatuuri kontroll. Leiutajateks on *Nakata Takeshi*, *Horinouchi Atsushi* ja *Taino Kazuo*. Kõik kolm neist Jaapanist, esindades *Sanyo Electric CO* nimelist firmat. Kirjeldavad nad enda leiutist kui mikrolaineahju, mida kontrollitakse temperatuurianduri abil, mikroarvuti kontrollib kuumutamist senikaua kuni anduri poolt loetav temperatuur ületab esimese temperatuuri seadeväärtuse, hetkeliselt katkestades mikrolaine sagedused, et viimane ei segaks mõõtetulemust. Seda aastal 1984, kui kontaktivaba mõõtmine oli veel vähearenenud ja levik piiratud.

2) US20060029742(A1)– aparaat ja meetod lehtmaterjalide töötlemiseks. Leiutajateks on *Cesak James* ja *Ramabadrán Arun*. Mõlemaid neist *USA*-st ja esindavad *Spraying Systems Co* nimelist firmat. Nende leiutiskirjeldus näeb ette venitatud lehtmaterjali töötlemisliini, mis jahutab materjali vastavalt kontrolleri seadeväärtusele. Sealjuures temperatuuri mõõtmiseks on ettenähtud kontaktivaba mõõtmine. Patendi puhul on märkimisväärne mitmete jahutustsoonide olemasolu ja tsooniline temperatuuri kontroll.

3) US4832885(A)– meetod ja aparaat mõõtmaks ja kontrollimaks termoplasti lehe puhumist. Leiutajaks on *Gross Jonathan*, *Mobil Oil Corp* nimelisest firmast *USA*-s. Leiutise sisuks on vahtplast lehe puhumine termovormija kütteahjus. Leiutis erineb mõnevõrra sellest, et antud juhul üritatakse temperatuurimõõtmise asemel korrigeerida protsessi hoopis plasti paksuse mõõtmisega, reguleerides vastavalt sellele ahju temperatuuri. Paksuse mõõtmiseks on kasutusel samuti kontaktivaba paksuse mõõtmine. Mis oma olemuselt ei erine palju lõputões kasutatud lahendusest. Patent on aastast 1988.

4) US2010282741(A1)– meetod kontrollimaks ja optimeerimaks mikrolaine abil plastiklehe kuumutust. Leiutajateks on *Van Daele Ronald* (Belgiast) ning *Lewis Ray A* ja *Haley Jr*

*Robert P USA*-st. Taotlejaks on *Dow Global Technologies Inc* nimeline firma. Patent on aastast 2010. Patendi sisuks on termoplasti lehe kuumutamine mikrolainete abil konveiermeetodil. Antud patent eristub just enda sisu poolest, kus on kirjeldatud infrapuna kuumutuseadmete miinuseid, mis omakorda juhib tähelepanu muutmisvajadustele.

Nimelt kirjeldatakse täpselt infrapuna kuumutamise kadusid atmosfääri ja seda, et pinnatemperatuur lehtmaterjalikorral on kõrgemal temperatuuril, selleks, et pinnalt leviks soojus läbikandena materjali sisemusse, mis võimaldaks materjali edukalt töödelda. Mõõtmiseks on soovitud kasutada infrapuna kaamerat või analoogset viisi.

5) US4156626(A)– meetod ja aparatuur selektiivselt kuumutamaks kindlat ala kiirgusenergia abil. Leiutajataks on *James J. Souder* . Patent on aastast 1977. Kuumutatavaks materjaliks on kas termoplastik või pinnakate eesmärgiga sulgeda konteineri küljed termiliselt. See meetod näeb ette kiirgusliku energiaallika kasutamist, mis fokuseeritakse kindale alale, et luua kontakt kahe materjali vahel.

Selle patendi sisu rõhub infrapuna küttekehade ebapraktilisele poolele, kui küttekehad pole kaetud reflektorkattega, siis on küttekeha ebaefektiivne, kulutades palju energiat. Paraku antud lõputöö teemas kasutatavad infrapuna küttekehad on juba kuldse reflektorkattega kaetud. Siiski võib täheldada sarnaselt mainitud teist laadi küttekehadele suure massi olemasolu, mis väljendub selles, et ahju seiskamisel kiirgub endiselt materjali pinnale soojusenergiat, ja seda tuleks siis kuidagi tõkestada või arvestada küttekehade juhtimisel kontrolleri poolt.

Arendusideedest võiks välja tuua lisaks tsoonilisele temperatuurikontrollile ja võimalusele juhtida kogu protsessi ekraanilt, luua võimalus küttekehade katmiseks mehaaniliselt vältimaks soojusliku kiirguse levikut peale kütmissprotsessi.

### **3.8. Seadme juhtprogramm**

Selleks, et mõista paremini, kuidas toimib juhtprogramm ja protsessi kontrolleri loogika on koostatatud programmi loogikaskeem. Kuna kontrolleri abil on võimalik läbi viia ka

releelülitusi erinevate lisaseadmete tarvis, siis arvestatud on ka neid programmi koostamisel.

Selleks, et kontrolleri abil tööd saaks alustada, on tähtis kontrollida, kas mikroarvuti on käivitunud. Selle eduka käivitumise korral kuvatakse programmeeritaval puutetundlikul ekraanimoodulil vastav tekst, mida ei ilmu võimalike tõrgete korral. Sellisel juhul tuleb mikroarvuti uuesti käivitada.

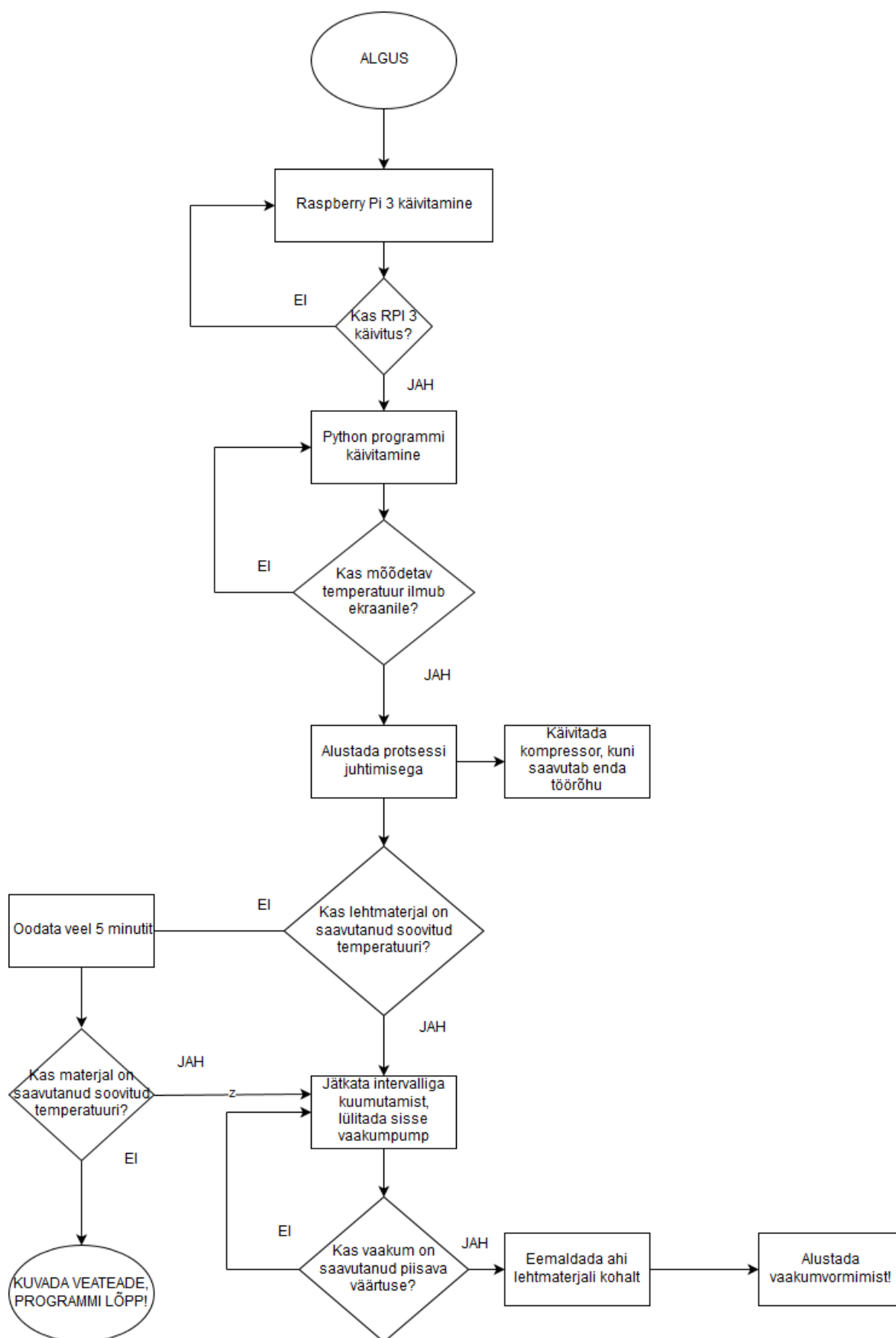
Programmeerimiskeele *Python* abil kirjutatud juhtprogrammi korral on tegu pidevalt korduva tsüklilise programmiga, kus mikroarvuti abil jälgitakse jadaühenduse kaudu liikuvat informatsiooni. Kui ühtegi nuppu pole juhtekraanil vajutatud, siis puudub ka väljastatav informatsioon. Nupuvajutuse korral väljastatakse ekraani poolt vastav *ASCII* kood, mida programmeerimisvõtete abil vastavalt töödeldakse soovitud suunas.

Näiteks seadetemperatuuri kinnitamisel vajutades vastavat nuppu ekraanil kirjutatakse soovitud temperatuuri väärtus *Exceli* faili. Vastasel juhul kaob selle väärtus mälust ja releelülituste läbiviimine oleks raskendatud limiteeritud ajaga. Liseaseadmete releelülituse korral rakendab esmane vajutus relee ja järgneva vajutuse korral tühistatakse eelneva väärtus teise koodilõigu väljastamisega ekraani poolt.

Teatud toimingute läbiviimine näiteks nagu kompressori sisselülitamine on vajalik seadme tööks kuid lisaseadmete toimimine on automaatjuhtimisega. Rõhu saavutamisel seade seiskub. Seetõttu pole programmi koostamisel vajadus täiendava kontrolli järele.

Ekraanipildi kuvamine ei tähenda alati seda, et kontroller töövõimeline oleks. Kasutatud on programmeeritavat juhtekraani moodulit, mis käivitub toitepinge olemasolul ja kuvab sinna eelnevalt laetud juhtprogrammi.

Järgneval joonisel 3.10 on välja toodud seadme juhtprogrammi loogikaskeem. Lisas A on välja toodud juhtprogramm *Python* programmeerimiskeeles.



**Joonis 3.10.** Programmi loogikaskeem



Seletamaks asjaolu siis lähtuvalt protsessi kontrolleri kasutusala, milleks antud juhul on lehtmaterjalide vaakumvormimine, on kirjeldatud neid ka protsessi juhtimisel. Esialgselt on tegu kontrolleri, mis ei kasuta *PID* juhtimisalgoritmi, vaid vastavalt seadeväärtusele sisse ja välja lülitamist. Täiendavalt on võimalik seda edasi arendada vajaduse tekkimise korral.

### 3.9. Seadme maksumus

Kõikide asjade valmistamine sealhulgas ka prototüüpimine on seotud mõningaste kulutustega. Sealjuures pole arvestatud enda kulunud aega ja vahendeid, mis eelnevalt juba olemas olid.

Kuna algne eesmärk oli valmistada seadme prototüüp, mille abil oleks lehtmaterjalide termilise töötlemise protsessi võimalik juhtida, siis selleks, et sellest ka kasu võiks olla, on tähtis, et kulud ei ületaks konkurentide pakutavate seadmete väärust, vastasel juhul satuks kahtluse alla taolise seadme loomise perspektiivikus.

Arvestatud pole ka täiendavate ümberehituste tegemise kulukusega, mis jooksvalt või peale seadme prototüübi valmimist esile kerkida võivad seoses parandusettepanekutega. Väljatoodud hinnad on ligikaudsed, arvestades võimalusel nii posti-, tolli- kui ka käibemaksu kulusid, ümardatuna täisarvudeni. Järgnevalt tabelis 3.6 on välja toodud seadme prototüübi valmistamise kulutused.

**Tabel 3.6.** Seadme komponentide hinnad

Detaili nimetus	Kogus, ühik	Hind kokku, €
A	1	2
Puutetundlik ekraan <i>Nextion</i> , 7"	1 tk	80
<i>Raspberry Pi</i> 3 mikroarvuti	1 tk	37
Mälukaart 16 GB <i>Raspberry Pi</i> -le	1 tk	12
Infrapuna temperatuuriandurid	4 tk	120
Releede plaat 8 kanaliga	1 tk	24
Ekraani ümbris	1 tk	22
Andurite harukarp	1 tk	8
Juhtme läbiviik M12	10 tk	8
Juht 8×0.5 mm <sup>2</sup>	4 m	13
Lasermoodul +5V DC	4 tk	10
<i>Raspberry Pi</i> korpus	1 tk	9
<i>Raspberry Pi</i> toitemoodul 2A	1 tk	12
<i>Arduino Uno R3</i>	1 tk	10

**Tabeli 3.6. jätk.** Seadme komponentide hinnad

<b>A</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<i>Arduino Uno</i> toitekaabel	1 tk	3
Pooljuhtrelee 40 A	4 tk	15
<i>Raspberry Pi</i> protoosad	X tk	15
Ühenduspistik 3×3	1 tk	5
Ühenduspistik 2×2	2 tk	6
Pistikukomplektid 4-pin	9 tk	20
Pistikukomplektid 2-pin	9 tk	10
3D printimine plastikdetailidele	4 tk	72
Kaitseklaas anduritele	4 tk	10
Võimsuse regulaatorid	4 tk	78
<b>KOKKU</b>		600

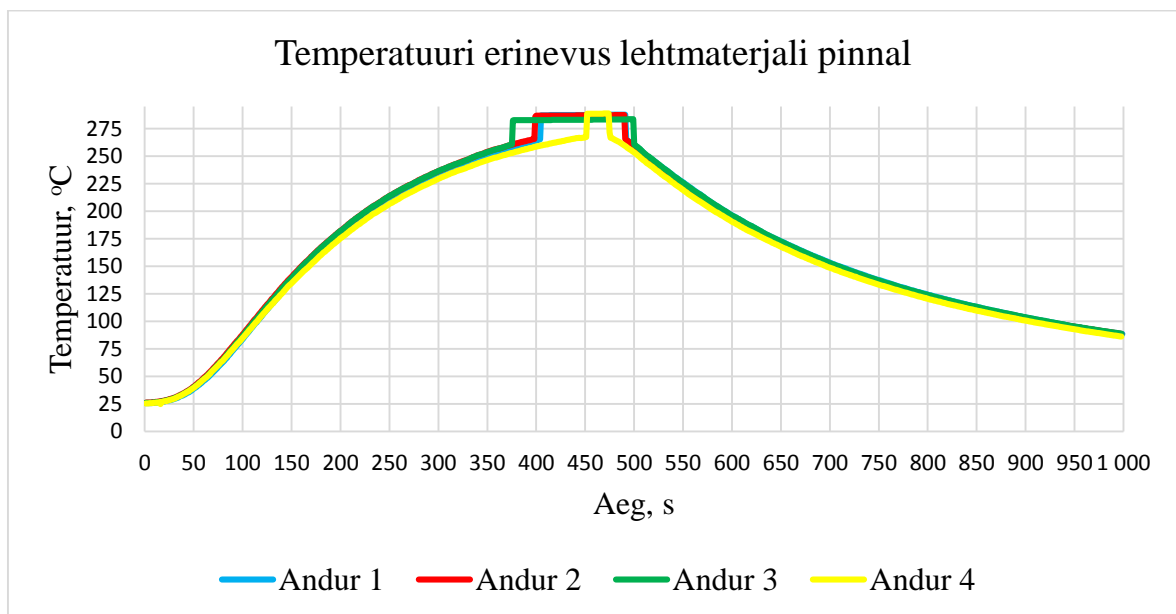
Komponentide maksumus kokku on arvestuslikult ligi 600 eurot. Sellest valdav osa kulus kontrolleri põhikomponentidele, milleks on andurid, ekraan, mikroarvuti, ja võimsuse regulaatorid.

Pealtnäha lihtsad asjad nagu ühendustarvikud, anduri ja komponentide kaitsmine korpuse abil ja pooljuhtreleed olid järgmised suured artiklid. Samuti mälukaart ja toitemoodul. Kulusid on võimalik vähendada muutes ekraani suurust, mälukaarti suurust, andurite kaitsekorpuse valmistustehnoloogiat.

## 4. UURIMISTÖÖ TULEMUSED JA ARUTELU

Joonisel 4.1 kujutatud graafikul on välja toodud erinevused lehtmaterjali pinnatemperatuuride mõõtmises nelja erineva anduri abil. Mõõtmised on läbi viidud musta värvusega lehtmaterjali (terasplekk) pinnal kütteahjus, mis simuleerib kõige täpsemalt reaalselt olukorda, mida vastava kontrolleri abil juhitakse.

Sarnaselt termoplastikule tekib ka teraspleki korral olukord, kus materjal ei ole püsivalt paigal, vaid temperatuuri tõustes hakkab lainetama. Samuti on värvitud teraspleki korral paremad võimalused täiendava temperatuuri kontrollmõõtmise läbiviimiseks näiteks termopaari abil.



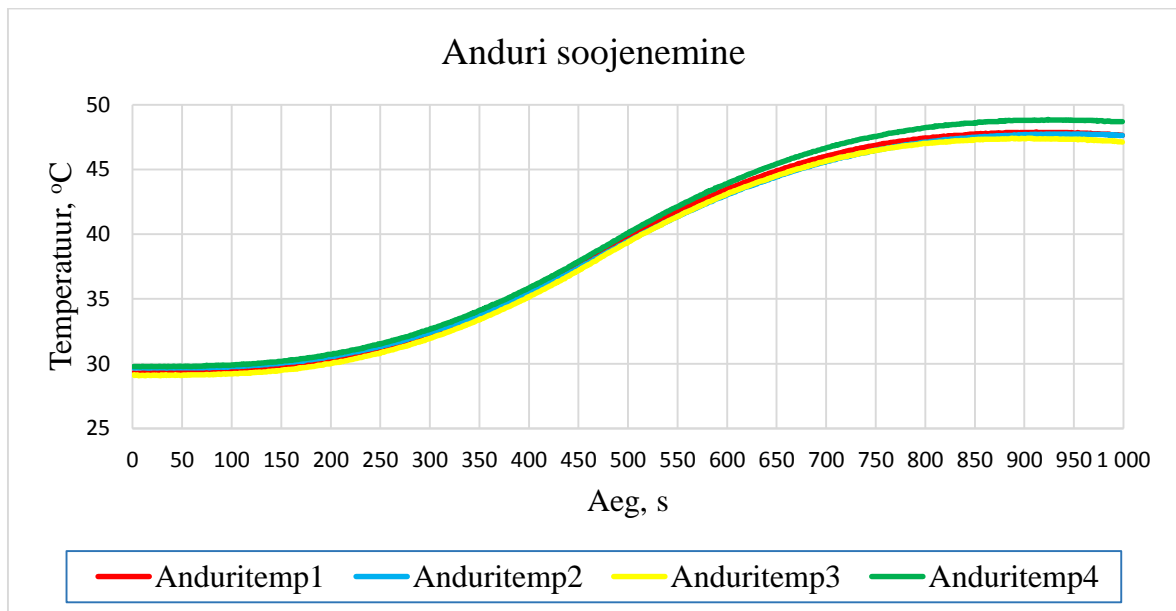
**Joonis 4.1.** Temperatuuri erinevus lehtmaterjali pinnal

Jooniselt lähtub, et lehtmaterjali kuumutamistsükli korral andurid suudavad registreerida võrdväärseid tulemusi, kõrvalekalded täiesti ühtlasest temperatuurist on seletatavad materjali kuju muutusest tulenevalt.

Nimelt materjali kuumenedes materjal muutub kumeraks ja sellisel juhul muutub kaugus küttekehast ja seeläbi ka soojussisestus materjali. Lisaks on tulenevalt küttekeha

paigutusest anduri suhtes võimalik täheldada mõningaid kõrvalekaldeid keskmisest temperatuurist. Lisaks mõõdeti katseliselt anduri soojenemist eelneval joonisel 4.1 kirjeldatud katse korral samaaegselt. Anduri soojenemine antud katse korral on suurusjärgus ligi 25 °C, 15-minutise tsükli korral, jäädes igati sobilikku vahemikku.

Kuna esialgselt poole meetri kaugusele kavandatud andurid lehtmaterjali pinnatemperatuuri mõõtmiseks olid reaalselt 0,3 meetri kaugusel, siis võib jooniselt 4.2 veenduda, et andurit kahjustav kuumuse mõju puudub 15- minutilise kuumutustsükli korral. Mis on enam kui piisav termoplastide vormimise kuumutustsükli korral, arvestades anduri reaalselt paiknemist kaugemal, kui olukorra simulatsiooni korral.



**Joonis 4.2.** Anduri soojenemine katse korral

Joonisel 4.2 on kuvatud anduri soojenemise graafik vastavalt anduritele. Suure mõõtetiheduse tõttu võib jääda ekslikult mulje, et tegu on funktsiooniga. Reaalsuses on anduri soojenemine ühtlane ja seotud enamasti andurit kaitsva korpuse isoleerimisvõimega.

Juhuks, kui andur peaks lubatust rohkem kuumenema, on võimalik lisada kontrolleri alarm, ja selle puhul korral lülitada sisse elektriliselt juhitava pneumaatilise klapi abil suruõhuga anduri korpuse jahutus seni, kuni anduri temperatuur on jahtunud kuni lubatud väärtuseni. Anduri jahutamist antud lõputöös teema piiritlemise eesmärgil antud juhul ei käsitleta.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli koostada seadme prototüüp, mille abil oleks võimalik protsessi juhtimine kontaktivaba pinnatemperatuuri mõõtmise teel. Seatud eesmärkide alla kuulus ka seadme koostamiseks vajalike materjalide soetamismaksumus alla 600 €, seadme komponentide asendatavuse lihtsus võimalike rikete korral.

Lisaks materjali pinnatemperatuuri järgi kütteseadme juhtimise võimalus ja kogutud andmete salvestamise võimalus nende hilisemaks analüüsiks.

Uurimistöö jaoks teostati kontrollmõõtmised seadme mõõtmiskindluse tagamiseks ja andmete lugemistäpsuse varieeruvuse hindamiseks. Kokku sooritati mõõtmine nelja anduriga tuhandel korral iga sekundi tagant. Mõõtes sealjuures nii objektitemperatuuri kui ka anduri enda temperatuuri. Salvestades samuti ka mõõtmise kuupäeva kui ka kellaaja.

Järgnevalt võib teha kokkuvõtted ja järeldused:

1. Loodud seadme prototüüp on võimeline kontaktivaba temperatuuri mõõtmise teel pinnatemperatuuri mõõtma.
2. Valmistamise protsessi käigus ilmsiks tulnud probleemid said toimiva lahenduse.
3. Töö käigus on lahendatud järgmised probleemid:

- 1) Andurite kaitse on tagatud;
- 2) Andurite väärtuste lugemine on tagatud;
- 3) Ekraanilt juhtimine on tagatud;
- 4) Andurite jahutus on tagatud;
- 5) Emissiooniteguri muutmine on tagatud.

Käesoleva magistritöö edasiarendusena võiks lisada ekraanilt emissiooniteguri muutmise võimaluse, lisada graafikute kuvamise. Lisaks täpse termopaari mõõtmisvõimekuse lisamine andurite kalibreerimise tarvis korrektse emissiooniteguri väljaselgitamiseks. Hilisemal vajaduse ilmnemisel ka *PID* reguleerimise võimekus.

## KIRJANDUS

1. Webster J. Measurement, instrumentation and sensors handbook. CRC Press. (1999)  
<http://www.kelm.ftn.uns.ac.rs/literatura/si/pdf/Measurement%20Instrumentation%20Sensors.pdf>  
(10.02.2018)
2. Kütteahju kasutatavate küttekehade nimiaandmed ja pilt. Aliexpress.com.  
<https://www.aliexpress.com/item/Quartz-glass-heater-element-for-drying/32616458588.html>  
(12.02.2018)
3. Võimsuse regulaatorite teooria. Chromalox.com.  
<https://www.chromalox.com/-/media/files/training-manuals/en-us/tm-pk501-scr-power.pdf>  
(20.02.2018)
4. Võimsuse regulaatori põhielemendi nimiaandmed. KCD Semiconductors.  
<http://file.yizimg.com/196127/2016930-10638360.pdf> (20.02.2018)
5. Võimsuse regulaatori andmed, pilt. Ebay.in.  
<https://www.ebay.in/itm/AC-220V-10000W-SCR-Digital-Voltage-Regulator-for-Dimming-Speed-Temperature-/2223373179036>. (20.02.2018)
6. Erinevate materjalide emissioonitegurid. Thermoworks.com.  
[https://www.thermoworks.com/emissivity\\_table](https://www.thermoworks.com/emissivity_table) (25.02.2018)
7. Non-contact thermometers– emissivity. Control.fs.cvut.cz.  
[http://control.fs.cvut.cz/sites/default/files/Slou%C4%8Den%C3%A9n%C3%A1vody\\_ENG.pdf](http://control.fs.cvut.cz/sites/default/files/Slou%C4%8Den%C3%A9n%C3%A1vody_ENG.pdf)  
(05.03.2018)
8. *Omega CN1504* protsessi kontrolleri. Omega Engineering inc. Omegaeng.cz.  
[https://www.omegaeng.cz/pptst\\_eng/CN1504\\_1507.html](https://www.omegaeng.cz/pptst_eng/CN1504_1507.html) (15.03.2018)
9. *Omega* infrapuna temperatuuriandurid. Omega Engineering inc. Omega.com.  
[https://www.omega.com/manuals/manualpdf/M4252.pdf#search=OS35-20-MA-500C-24V omega andurid](https://www.omega.com/manuals/manualpdf/M4252.pdf#search=OS35-20-MA-500C-24V%20omega%20andurid) (15.03.2018)
10. *Calex pyrominibus* anduri seeria kirjeldus. Calex.co.uk. (2015)  
<http://www.calex.co.uk/site/wp-content/uploads/2015/08/pyrominibus.jpg> (20.03.2018)
11. *Arduino Uno R3* andmemah. Pololu Corporation. Pololu.com.  
<https://www.pololu.com/product/2191/specs> (22.03.2018)
12. *Raspberry Pi* andmed. Raspberrypi.org.  
<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/> (22.03.2018)
13. *Nextion NX8048T070* programmeeritava ekraanimooduli põhiaandmed. Itead.cc.  
<https://www.itead.cc/nextion-nx8048t070.html> (24.03.2018)
14. VNC ühenduse kirjeldus. Wikipedia.org.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Virtual\\_Network\\_Computing](https://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_Network_Computing) (25.03.2018)

15. Pinnatemperatuuri sensori pilt. TheSensorConnection.com.  
<http://thesensorconnection.com/thermocouples/all-thermocouples/weld-pad-surface-temperature-thermocouple-probe> (28.03.2018)
16. Tüüpilise infrapuna temperatuurianduri pilt. Tashika.co.jp.  
[http://www.tashika.co.jp/products/temp\\_sensors/infrared\\_temperatur\\_sensor\\_module/img/product\\_14.jpg](http://www.tashika.co.jp/products/temp_sensors/infrared_temperatur_sensor_module/img/product_14.jpg) (30.03.2018)
17. Andur *CJMCU-MLX90614ESF-DCI*. Ebay.co.uk.  
<https://www.ebay.co.uk/itm/MLX90614-Infrared-Thermometer-Temperature-Measuring-IR-Sensor-Module-ESF-Sensor/292090027725> (05.03.2018)
18. Anduri *MLX90614* põhiandmed. Melexis.com. (2012)  
<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MLX90614.pdf> (05.04.2018)
19. A Vacuum Forming Guide. Formech International LTD.  
<https://capla.arizona.edu/forms/shop/fromechvacuumguide.pdf> (05.04.2018)
20. Anduri arendusplaat *EVB90614* põhiandmed. Elfadistelec.ee.  
<https://www.elfadistelec.ee/et/development-kit-melexis-evb90614/p/17321584> (05.04.2018)
21. Anduri arendusplaat *EVB90614* põhiandmed. Melexis.com.  
<https://www.melexis.com/en/product/EVB90614/Evaluation-Board-MLX90614> (10.04.2018)
22. Anduri *PEC* kood. Wikipedia.org.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/System\\_Management\\_Bus](https://en.wikipedia.org/wiki/System_Management_Bus) (12.04.2018)
23. *Arduino Uno* kood anduri aadressi muutmiseks lisas B. Chris Ramsay.co.uk  
[https://github.com/sparkfun/SparkFun\\_MLX90614\\_Arduino\\_Library/blob/master/examples/MLX90614\\_Set\\_Address/MLX90614\\_Set\\_Address.ino](https://github.com/sparkfun/SparkFun_MLX90614_Arduino_Library/blob/master/examples/MLX90614_Set_Address/MLX90614_Set_Address.ino) (12.04.2018)
24. Elektrilise kaitseklassi koodid. Wikipedia.org.  
<https://et.wikipedia.org/wiki/IP-kood> (20.04.2018)
25. Optical glass. Edmundoptics.com.  
<https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/optics/optical-glass/> (20.04.2018)
26. Kasutatava kaabli nimiaandmed. Oomipood.ee.  
<https://www.oomipood.ee/kataloog/tme/toode?sku=YTDY8%2F0.50&t=8x0.5> (20.04.2018)
27. Arendusplaadi *EVB90614* nimiaandmed. Elfadistelec.ee.  
[https://www.elfadistelec.ee/Web/Downloads/\\_m/an/evb90614-5\\_eng\\_man.pdf](https://www.elfadistelec.ee/Web/Downloads/_m/an/evb90614-5_eng_man.pdf) (20.04.2018)
28. Emissiooniteguri muutmise anduril. Melexis.com.  
<https://www.melexis.com/-/media/files/documents/application-notes/mlx90614-changing-emissivity-unlocking-key-application-note-melexis.pdf> (24.04.2018)
29. *Raspberry Pi* väljundviikude koormus. Thebox.myzen.co.uk.  
[http://www.thebox.myzen.co.uk/Raspberry/Understanding\\_Outputs.html](http://www.thebox.myzen.co.uk/Raspberry/Understanding_Outputs.html) (24.04.2018)
30. Releede plaat 8-kanaliga nimiaandmed. Aliexpress.com.  
<https://www.aliexpress.com/item/8-Channel-SSR-5A-DC-DC-5V-220V-Solid-State-Relay/32667999762.html> (28.04.2018)

31. Pooljuhtreleed kirjeldus. Wikipedia.org.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Solid-state\\_relay/](https://en.wikipedia.org/wiki/Solid-state_relay/) (08.05.2018)
32. Pooljuhtreleede teooria. Allaboutcircuits.com.  
<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/basics-of-ssr-solid-state-relay-the-switching-device/> (09.05.2018)
33. Kood anduri MLX90614 jaoks. Github.com.  
<https://github.com/CRImier/python-MLX90614/blob/master/mlx90614.py> (12.04.2018)
34. Kood .csv faili kirjutamiseks . Python.org.  
<https://docs.python.org/2/library/csv.html> (15.04.2018)
35. Kood emissiooniteguri muutmiseks *Arduinoga*. Github.com.  
[https://github.com/sparkfun/IR\\_Thermometer\\_Evaluation\\_Board-MLX90614/blob/master/Libraries/Arduino/examples/MLX90614\\_Set\\_Emissivity/MLX90614\\_Set\\_Emissivity.ino](https://github.com/sparkfun/IR_Thermometer_Evaluation_Board-MLX90614/blob/master/Libraries/Arduino/examples/MLX90614_Set_Emissivity/MLX90614_Set_Emissivity.ino) (10.05.2018)



## SUMMARY

The aim of this master's thesis was to build a prototype of a device, which would allow controlling the process by non-contact surface temperature measurement.

One of the goals was to make sure that the components price listing wouldn't exceed a price tag of 600 €, the components would be easily replaceable in case of malfunctions. A capability to control the heater by sheet materials surface temperature and an option to save measurement data for later analysis was also needed.

Measurements were carried out to ensure reliability of the device and for evaluating reading accuracy of measured data and its variability. A total of a thousand measurements were taken with time interval of one second between them. Measuring the temperature of the sensor and object as well, also saving date and time values.

The following summaries and conclusions can be made:

1. The created prototype of the device is capable of measuring surface temperature using non-contact measuring.
2. A working solution was found to the problems that emerged during the development process.
3. The following problems were solved during the thesis:
  - 1) Sensor protection is guaranteed;
  - 2) Reading sensor values is guaranteed;
  - 3) Managing process from a touchscreen is guaranteed;
  - 4) The cooling of the sensors is guaranteed;
  - 5) Changing the emissivity is guaranteed.

As a further development an option for changing the emissivity factor could be added from the screen, adding an option for displaying graphics. Furthermore adding a precise thermocouple for calibrating the sensors. In case of a determined need, a *PID* regulation capability.

**LISAD**

## LISA A Juhtprogramm

```
import csv #faili kirjutamiseks
import datetime #kuup2eva lisamiseks
import smbus #yhenduse loomiseks anduriga
import time #kellaaja lisamiseks
from time import sleep #viivituse kasutamiseks
import serial #serial yhenduse loomiseks
ser = serial.Serial('/dev/ttyAMA0',#ekraani aadress
    baudrate=9600,
    timeout=1,
    rtscts=False,
    xonxoff=False)
import RPi.GPIO as GPIO#releelylituste jaoks GPIO siinilt
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)#veateateid ei kuvata
previousVals = [None for i in xrange(4)]
rvals = ['OFF' for i in xrange(4)]
class MLX90614():#anduri m2huaadresside defineerimine
    MLX90614_RAWIR1=0x04
    MLX90614_RAWIR2=0x05
    MLX90614_TA=0x06
    MLX90614_TOBJ1=0x07
    MLX90614_TOBJ2=0x08
    MLX90614_TOMAX=0x20
    MLX90614_TOMIN=0x21
    MLX90614_PWMCTRL=0x22
    MLX90614_TARANGE=0x23
    MLX90614_EMISS=0x24
    MLX90614_CONFIG=0x25
    MLX90614_ADDR=0x0E
    MLX90614_ID1=0x3C
    MLX90614_ID2=0x3D
    MLX90614_ID3=0x3E
    MLX90614_ID4=0x3F
    comm_retries = 10#10 anduriga yhenduse loomist enne kui veateade kuvatakse
    comm_sleep_amount = 0.1#ajaline interval andurilt info lugemisel korral
    def __init__(self, address=0x5a, bus_num=1):
        self.bus_num = bus_num
        self.address = address
        self.bus = smbus.SMBus(bus=bus_num)
    def read_reg(self, reg_addr):
        for i in range(self.comm_retries):
            try:
```

Joonis 4.2. Python kood Raspberryle [33] [34]

## LISA A. järg: Juhtprogramm

```
        return self.bus.read_word_data(self.address, reg_addr)
    except IOError as e:
        sleep(self.comm_sleep_amount)
def data_to_temp(self, data):
    temp = (data*0.02) - 273.15
    return temp
def get_amb_temp(self):
    data = self.read_reg(self.MLX90614_TA)
    return self.data_to_temp(data)
def get_obj_temp(self):
    data = self.read_reg(self.MLX90614_TOBJ1)
    return self.data_to_temp(data)
def korrektuur(x, i):
    """Korrigeerib temperatuuri"""
    return eval(polynoomid[i])
num_sensors = 4 #andurite arvu defineerimine
polynoomid = ['-2e-05*x*x + 0.0016*x + 22.929',
               '6e-06*x*x - 0.0019*x + 22.926',
               '-1e-05*x*x - 2e-05*x + 22.841',
               '-6e-06*x*x - 0.0003*x + 22.58'] #igale andurile hetkel suvalise erineva polynoomi v22rtuse lisamine
EndCom = b'\xff\xff\xff'
def dset(s, b, v):
    ser.write((b'\n%d.val=%d' + EndCom) % (int(b), int(v)))
def update(s, rval, pin, upVal, downVal):
    if s >= upVal:
        GPIO.setup(pin, GPIO.OUT)# 4 #17 #27 #22 GPIO viigud
        GPIO.output(pin, GPIO.HIGH)#HIGH on kõrgseis"LOW madalseis".
        print '\nRELEE ON\n'#relee aktiivne
        rval = 'ON'
    elif s <= downVal: #juhul kui nii pole siis
        GPIO.setup(pin, GPIO.OUT)
        GPIO.output(pin, GPIO.LOW)
        print '\nRELEE OFF\n'#relee on mitteaktiivne
        rval = 'OFF'
    return rval
delay = 0.001
count = 1000 #mCμCμtmiste arv tsykli jooksul
ANDURIKAART = [4, 5, 6, 7] #aknad n4,n5,n6,n7
RELEKAART = [4, 17, 22, 27] #GPIO viigud 4,17,22,27
blockMap = {45: 'E', 46: 'OFF', 47: 'OFF', 48: 'OFF'} # relee v2ljalytitatud
block2relay = {45: 4, 46: 17, 47: 22, 48: 27}#blokk A vastab v2ljundkoodile aadressiga 45, GPIO pin 4 jne.
block2char = {45: 'A', 46: 'B', 47: 'C', 48: 'D'}
```

Joonis 4.2. Python kood Raspberryle jätk [33] [34]

## LISA A. järg: Juhtprogramm

```
with open('andmed.csv', 'wb') as csvfile: #ava fail andmed.csv
    fieldnames = ['KUUP2EV', 'KELLA.AEG', 'TOBJ1, oC', 'TAMB1, oC', 'TOBJ2, oC', 'TAMB2, oC',
                  'TOBJ3, oC', 'TAMB3, oC', 'TOBJ4, oC', 'TAMB4, oC']
    for char in ['A', 'B', 'C', 'D']:
        fieldnames.extend(['Temp'+char, 'Relay'+char]) #lisatulpade nimed, seadetemp kontrolleriist ja releev22rtus
    writer = csv.DictWriter(csvfile, fieldnames=fieldnames)
    writer.writeheader()
    addresses = [0x5a, 0x5b, 0x5c, 0x5d] #Andurite aadressid fyysilisel kujul
    sensors = [MLX90614(address=address) for address in addresses]
    for j in xrange(count):
        cells = {}
        curtime = datetime.datetime.now()
        cells['KUUP2EV'] = curtime.date()
        cells['KELLA.AEG'] = curtime.time().strftime("%H:%M:%S") #kellaaja vormindamine
        for i, sensor in enumerate(sensors):
            amb = sensor.get_amb_temp()
            obj = sensor.get_obj_temp()
            dset(ser, ANDURIKAART[i], obj)
            print('uusv22rtus: %3d blokis %d' % (obj, ANDURIKAART[i]))
            r = ser.read(11)
            if not r:
                continue
            print ' '.join([str(ord(x)) for x in r])
            val = [str(ord(x)) for x in r]
            dec = int(val[7])
            block = int(hex(int(val[2]))[2:])
            print "Value: %d at sensor %d" % (dec, block), "\n" #python v2ljastus
            r = b"
            if block not in blockMap:
                continue
            print 'OBJ:', obj
            blockMap[block] = update(dec, blockMap[block], block2relay[block], obj, obj)
            char = block2char[block]
            block2prev[block] = dec
            for block in xrange(45, 49):
                char = block2char[block]
                cells['Temp'+char] = block2prev[block]
                cells['Relay'+char] = blockMap[block]
                cells['TAMB%d, oC' % (i+1)] = '%.2f' % amb
                cells['TOBJ%d, oC' % (i+1)] = '%.2f' % obj
            print 'Anduritemp %x: %f' % (sensor.address, amb) #ainult python v2ljastus
            print 'Objektitemp %x: %f' % (sensor.address, obj)
        print '*' * 40 #eraldusjoon andmete vahele
        writer.writerow(cells)
```

Joonis 4.2. Python kood Raspberryle jätk [33] [34]

## LISA B Kood anduri koodi vahetuseks

```
#include <Wire.h> // I2C library, required for MLX90614
#include <SparkFunMLX90614.h> // SparkFunMLX90614 Arduino library
IRTherm therm; // Create an IRTherm object to interact with throughout
const byte oldAddress = 0x5A;
const byte newAddress = 0x5D;
void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Initialize serial to log output
  Serial.println("Press a key to begin");
  while (!Serial.available()) ;
  therm.begin(oldAddress); // Try using the old address first
  byte address;
  if (!therm.readID()) // Try reading the ID registers
  {
    // If the read fails, try re-initializing with the
    // new address. Maybe we've already set it.
    therm.begin(newAddress);
    if (therm.readID()) // Read from the ID registers
    { // If the read succeeded, print the ID:
      Serial.println("Communicated with new address.");
      Serial.println("ID: 0x" +
        String(therm.getIDH(), HEX) +
        String(therm.getIDL(), HEX));
    }
    else
    {
      Serial.println("Failed to communicate with either address.");
    }
  }
  else
  {
    // If the read succeeds, change the address to something
    // new.
    if (!therm.setAddress(newAddress))
    {
      Serial.println("Failed to set new address.");
    }
    else
    {
      Serial.println("Set the address to 0x" + String(newAddress, HEX));
      Serial.println("Cycle power to try it out.");
    }
  }
}
void loop()
{
}
```

**Joonis 4.3.** Aadressi muutmise kood Arduinole [23]

## LISA C Kood anduri emissiooniteguri vahetuseks

```
#include <wire.h> // I2C library, required for MLX90614
#include <SparkFunMLX90614.h> // SparkFunMLX90614 Arduino library
IRTherm therm; // Create an IRTherm object to interact with throughout
const byte LED_PIN = 8; // optional LED attached to pin 8 (active low)
float newEmissivity = 0.98;
void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Initialize serial to log output
  Serial.println("Press any key to begin");
  while (!Serial.available());
  therm.begin(); // Initialize thermal IR sensor
  therm.setUnit(TEMP_F); // Set the library's units to Fahrenheit
  // Call setEmissivity() to configure the MLX90614's
  // emissivity compensation:
  therm.setEmissivity(newEmissivity);
  // readEmissivity() can be called to read the device's
  // configured emissivity -- it'll return a value between
  // 0.1 and 1.0.
  Serial.println("Emissivity: " + String(therm.readEmissivity()));
  pinMode(LED_PIN, OUTPUT); // LED pin as output
  setLED(LOW); // LED OFF
}
void loop()
{
  setLED(HIGH); //LED on
  // Call therm.read() to read object and ambient temperatures from the sensor.
  if (therm.read()) // on success, read() will return 1, on fail 0.
  {
    // Use the object() and ambient() functions to grab the object and ambient
    // temperatures.
    // They'll be floats, calculated out to the unit you set with setUnit().
    Serial.print("Object: " + String(therm.object(), 2));
    Serial.write(' '); // Degree symbol
    Serial.println("F");
    Serial.print("Ambient: " + String(therm.ambient(), 2));
    Serial.write(' '); // Degree symbol
    Serial.println("F");
    Serial.println();
  }
  setLED(LOW);
  delay(500);
}
void setLED(bool on)
{
  if (on)
    digitalWrite(LED_PIN, LOW);
  else
    digitalWrite(LED_PIN, HIGH);
}
```

**Joonis 4.4.** Emissiooniteguri muutmise kood Arduinole [35]

# **Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Heimar Linde,  
sünniaeg 05.03.1992,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö „Lehtmaterjalide termilise töötlemise protsessi juhtseade“, mille juhendaja on Eugen Kokin (EMÜ-TI),

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor \_\_\_\_\_  
(allkiri)

Tartu, \_\_\_\_\_  
(kuupäev)

---

## **Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_  
(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_  
(kuupäev)

\_\_\_\_\_  
(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_  
(kuupäev)